

TRAITÉ

ÉLÉMENTAIRE

DE PHYSIQUE.

Les numéros entre parenthèses qui se trouvent dans le te[illegible] articles à consulter. Quand l'article se trouve dans un autre volume que le numéro de renvoi, ce volume est indiqué en chiffres romains.

La fraction placée à côté du numéro d'ordre de certaines figures indique le rapport entre les dimensions linéaires du dessin et celles de l'appareil figuré.

Toulouse. — Imprimerie de BONNAL et GIBRAC, rue Saint-Rome, 46.

TRAITÉ

ÉLÉMENTAIRE

DE PHYSIQUE

THÉORIQUE ET EXPÉRIMENTALE

AVEC LES APPLICATIONS

A LA MÉTÉOROLOGIE ET AUX ARTS INDUSTRIELS

A L'USAGE

DES FACULTÉS, DES ÉTABLISSEMENTS D'ENSEIGNEMENT SECONDAIRE ET DES ÉCOLES SPÉCIALES DU GOUVERNEMENT.

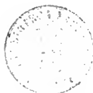
PAR P. A. DAGUIN

ANCIEN ÉLÈVE DE L'ÉCOLE NORMALE,

PROFESSEUR DE PHYSIQUE A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE TOULOUSE.

DEUXIÈME ÉDITION

entièrement refondue, avec un grand nombre de figures intercalées dans le texte.



TOME TROISIÈME.

TOULOUSE
ÉDOUARD PRIVAT
LIBRAIRE-ÉDITEUR,
Rue des Tourneurs, 45, hôtel Sipière.

PARIS
DEZOBRY & E. MAGDELEINE
LIBRAIRES-ÉDITEURS,
Rue des Écoles, 78.

1861

LIVRE V.

ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME.

1189. La chaleur et la lumière sont des agents universellement répandus; nous avons des organes qui nous font connaître à chaque instant leur existence, ces agents ne pouvaient donc être ignorés; c'est pour ainsi dire en naissant que nous apprenons à distinguer leurs effets. Nous allons, dans ce livre, étudier les propriétés d'un autre agent naturel, méconnu pendant un grand nombre de siècles, et aujourd'hui encore à peine connu du vulgaire, même chez les peuples les plus avancés dans les arts et les sciences. Cet agent a reçu le nom d'*électricité;* il est, aussi bien que la chaleur et la lumière, nécessaire à l'existence des êtres organisés, et si l'homme est resté si longtemps sans en distinguer les effets, c'est qu'il ne possède pas d'organe spécial destiné à les ressentir. Si ces effets se manifestent dans certaines circonstances, ils sont tellement vagues et tellement faciles à confondre avec d'autres impressions, qu'on n'a pas eu d'abord l'idée de les rapporter à une cause particulière. Le phénomène du tonnerre est bien, comme nous le verrons, une manifestation grandiose de l'électricité, mais on avait toujours cherché à l'expliquer en le rapportant à des causes connues.

Pendant longtemps, on a admis l'existence d'un autre agent, nommé *magnétisme*, qui servait à expliquer toute une classe de phénomènes. Mais nous verrons que le magnétisme doit être considéré comme une manière d'être particulière de l'électricité; c'est pourquoi nous l'avons réuni, dans ce livre, avec l'étude de l'électricité.

Les connaissances les plus anciennes dans cet ordre de phénomènes sont l'attraction de l'aimant pour le fer, et celle que l'ambre exerce sur les corps après qu'il a été frotté; nous trouvons là une preuve de l'importance dans les sciences, des faits en apparence les plus futiles. Ces expériences, qui semblaient n'être que des jeux d'enfant, ayant excité la curiosité de quelques esprits d'élite, des phénomènes nouveaux ont été découverts, les propriétés ont été généralisées, des lois remarquables sont sorties de recherches poursuivies avec

persévérance, la science s'est enrichie d'une multitude de découvertes importantes, et aujourd'hui le magnétisme et l'électricité reçoivent des applications merveilleuses, parmi lesquelles nous citerons la boussole, le paratonnerre, la galvanoplastique, la télégraphie électrique...; applications que nous aurons soin de faire connaître en temps et lieu.

Nous allons d'abord nous occuper des phénomènes du magnétisme, tels qu'ils se manifestent dans le fer et quelques autres substances où ses effets sont très intenses; tandis que dans la plupart des autres corps, ils ne se produisent qu'au moyen d'appareils d'une grande puissance que nous ne pourrons faire connaître que plus tard, après avoir étudié les principales propriétés de l'électricité. C'est alors que nous démontrerons la généralité du magnétisme, et que nous ferons voir comment les phénomènes magnétiques dépendent de l'agent électrique.

CHAPITRE PREMIER.

MAGNÉTISME DANS LE FER.

Magnus magnes ipse est globus terrestris.
(G. Gilberti, *de magnete physiologia nova*, Lond., 1600).

§ 1. — PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES AIMANTS.

1190. Aimants naturels. — On trouve dans certaines mines de fer, une pierre nommée *pierre d'aimant*, qui a la propriété d'attirer le fer et quelques autres substances. Cette propriété a d'abord été attribuée à un agent particulier, auquel on a donné le nom de *fluide magnétique* ou de *magnétisme*; ce dernier nom sert aussi à désigner la partie de la physique qui s'occupe des phénomènes que produit cet agent.

La pierre d'aimant est un oxyde de fer (Fe^3O^4), nommé par les minéralogistes *fer oxydulé* ou *fer magnétique*; c'est l'un des oxydes du fer les moins oxygénés, et l'un des nombreux minerais d'où l'on extrait ce métal. Il ne faut pas croire cependant que tous les échantillons de fer oxydulé soient des aimants.

La pierre d'aimant est noire ou brune ; on en trouve cependant de grise. Elle est quelquefois cristallisée en octaèdres plus ou moins modifiés, ou en dodécaèdres rhomboïdaux. Les meilleures sont homogènes, à cassure fine, susceptibles d'un beau poli. Leur densité, assez variable, est environ 1,24. On en trouve dans toutes les parties du monde ; les meilleures viennent des Indes, de la Norwége, de la Suède et de l'Allemagne. L'île d'Elbe en renferme beaucoup dans ses mines de fer ; on en tire aussi des Etats-Unis d'Amérique. En France, on n'en trouve que peu et de mauvaise qualité, principalement en Auvergne.

Suivant Aristote, l'aimant était connu de Thalés de Milet, 600 ans avant notre ère. Son nom, en grec μαγνητης, vient de celui de la ville de Magnésie, en Lydie, près du mont Sipyle, sur lequel furent trouvés les premiers aimants. Une autre ville du nom de Magnésie, située prés du fleuve Méandre, en fournissait également, ainsi que les environs de la ville d'Héraclée ; aussi, Platon dans le *Timée*, désigne-t-il l'aimant sous le nom de *pierre d'Héraclée*, et Sophocle, sous le nom de *pierre de Lydie*. Du nom grec de l'aimant on a fait le mot *magnétisme* et ses différents dérivés.

La découverte de l'aimant est mêlée de fables invraisemblables. D'aprés Pline, un berger ayant remarqué que le fer de sa houlette, ou ses souliers garnis de clous, adhéraient au sol, en chercha la cause et découvrit l'aimant. Isidore de Séville prétend que les Indiens l'ont connu les premiers, et c'est d'aprés lui que les auteurs du moyen-âge l'ont appelé *Lapis indicus*. Il est certain que les prêtres de l'ancienne Egypte le connaissaient; de plus, les Hébreux en trouvaient dans les centres habités par les tribus de Gad, d'Azer et d'Issachar ; ils le nommaient *schabol*,

Aimants artificiels. — Avant d'entamer l'étude des propriétés des aimants, nous devons dire qu'on sait fabriquer des *aimants artificiels*, qui consistent en barreaux d'acier auxquels on communique toutes les propriétés des aimants naturels, par des procédés que nous décrirons plus tard. Ces barreaux sont dits *aimantés*. Tout ce que nous allons dire s'applique aussi bien aux aimants artificiels qu'aux aimants naturels.

1191. DE L'ATTRACTION MAGNÉTIQUE. — De toutes les propriétés des aimants, les anciens n'ont guère connu que l'attraction qu'ils exercent sur le fer. Pour constater cette propriété, il suffit de rouler un aimant dans la limaille de fer ; on la voit s'attacher à sa surface en formant des houppes plus ou moins longues. On peut encore se servir du *pendule magnétique*, qui consiste en une balle de fer suspendue à un fil. On reconnaît que l'attraction magnétique se fait sentir à distance, et qu'elle diminue d'intensité quand la distance augmente. — Si l'on suspend au bassin d'une balance, un morceau de fer auquel on fait équilibre, et si l'on en approche ensuite un aimant, la balance s'incline, et l'on voit quels sont les poids nécessaires pour rétablir l'équilibre. Si l'on suspend l'aimant à son tour à la balance, et qu'on en approche le morceau de fer à la même distance, il faut les mêmes poids pour rétablir l'équilibre, ce qui montre que la force de l'aimant suit, comme toutes les forces, la loi de la réaction égale à

l'action (I, 78). On peut aussi faire mouvoir, en l'attirant avec un morceau de fer, un aimant mobile.

Pour obtenir un barreau mobile, on y creuse une petite cavité *o* (*fig.* 864), dans laquelle on enfonce une pointe *c*. Les gros barreaux, *ns* (*fig.* 865), sont suspendus à un fil sans torsion *f*, au moyen d'un étrier en carton ou en cuivre *o*, dont on voit la disposition en *a*.

Attraction magnétique à travers les corps. — L'attraction magnétique s'exerce à travers tous les corps connus. Les substances interposées ne modifient même pas l'intensité de l'effet produit, en exceptant toutefois les substances magnétiques, c'est-à-dire attirables à l'aimant. Ainsi, une baguette de fer suspendue sur une pointe, plongée dans l'eau, entourée d'un cercle de flammes, placée dans le vide... se met en mouvement dès qu'on en approche un aimant. Lucrèce avait vu la limaille de fer être attirée par un aimant à travers le fond d'un vase d'airain. Un brin de fil de fer suit, sur une lame de bois, de verre, de carton..., un aimant placé du côté opposé.

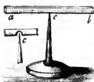


Fig. 864.



Fig. 865.

On a fait des horloges dont l'aiguille était remplacée par une balle d'acier roulant sur un cadran en clinquant, derrière lequel tournait un barreau aimanté mené par l'horloge. Une autre application très ingénieuse est l'indicateur à niveau des chaudières à vapeur de M. Lethuillier-Pinel (II, 1015).

1192. Des différentes substances magnétiques. — On nomme corps magnétiques tous ceux qui sont attirés par les aimants ordinaires. Les substances magnétiques sont le *fer*, la *fonte*, l'acier, les *oxydes de fer*, le *cobalt*, le *chrome*, le *nickel*, et enfin le *manganèse*; mais ce dernier métal ne donne de signes de magnétisme qu'après qu'on l'a refroidi jusqu'à 20 ou 25° au-dessous de zéro.

Influence de la température. — Newton a annoncé le premier que le fer n'est plus magnétique quand on le fait rougir. Ce résultat, contredit d'abord par Kircher, fut ensuite confirmé par Cavallo, qui montra que la température doit être portée au moins jusqu'au rouge cerise pour que tout signe de magnétisme disparaisse. D'après M. Barlow, la fonte de fer perd ses propriétés magnétiques au rouge blanc. M. Pouillet a conclu de ses expériences que : 1° le cobalt reste magnétique aux plus hautes températures; 2° le chrôme cesse d'être magnétique un peu au-dessous du rouge sombre; 3° la limite magnétique du nickel est vers 350°; 4° le manganèse ne commence à devenir magnétique que vers —20°. On a conclu de là que tous les corps deviendraient magnétiques si l'on pouvait les refroidir suffisamment. M. Pouillet pense que la chaleur agit en écartant les molécules, et que si l'on parvenait à les rapprocher

convenablement par un moyen quelconque, les propriétés magnétiques apparaîtraient dans tous les corps. Cette manière de voir est corroborée par cette remarque, que les métaux les plus magnétiques sont aussi ceux dans lesquels les atomes sont le plus rapprochés; car, si l'on divise leur poids spécifique par leur poids atomique, on trouve qu'ils donnent à peu d'exceptions près les quotients les plus petits. Le manganèse vient après le fer, le cobalt et le nickel, comme cela devait être. Cependant les substances qui ne contiennent que peu de fer en combinaison donnent des signes de magnétisme. La question a donc besoin d'être de nouveau étudiée. Nous verrons plus tard que toutes les substances sont influencées quand on les soumet à l'action d'aimants très puissants.

1193. Pôles des aimants. — Les différents points de la surface d'un aimant ne jouissent pas au même degré de la vertu attractive. Gilbert a reconnu qu'il y a toujours deux régions opposées où l'attraction est le plus prononcée; on les nomme *pôles* de l'aimant. Entre les deux pôles, ordinairement à égale distance, se



Fig. 866.

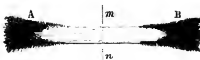


Fig. 867.

trouve une ligne, sur laquelle il n'y a pas d'attraction; on l'appelle *ligne neutre* ou *ligne moyenne*. Quand l'aimant est très allongé, les pôles sont ordinairement placés aux extrémités, et il y a au milieu un espace neutre plus ou moins étendu. Pour montrer l'existence des pôles, il suffit de rouler l'aimant dans la limaille de fer; on la voit s'attacher aux pôles, tandis que la ligne neutre n'en retient aucune parcelle, comme on le voit dans les *fig.* 866, 867, dont la première représente un aimant naturel, et la seconde un aimant artificiel, *mn* est la ligne neutre. On remarque que les parcelles de fer sont disposées les unes à la suite des autres, de manière à former des filaments perpendiculaires à la surface de l'aimant, et d'autant plus allongés qu'ils sont plus près des pôles. Nous verrons plus loin la cause de cette disposition (1197).

Spectre magnétique. — Pour montrer les pôles et la ligne neutre des aimants, Gilbert a imaginé l'expérience suivante : on met sur un barreau aimanté horizontal, une feuille de carton sur laquelle on projette, au moyen d'un petit tamis, de la fine limaille de fer. Les parcelles prennent alors un arrangement régulier en obéissant à l'attraction magnétique, comme on le voit dans la *fig.* 868. La tendance à se porter vers les pôles, et l'absence d'action sur la ligne moyenne, sont nettement indiquées par la forme des courbes dessinées par les parcelles de limaille. Ces dessins constituent le *spectre* ou

fantôme magnétique. De Haldat a trouvé moyen de les conserver; il les produit sur une lame de verre, et applique dessus, une feuille de papier enduite de colle d'amidon mêlée de gélatine; la limaille s'attache à la colle et reste adhérente à la feuille de papier.

1194. Pôles de même nom et de nom contraire. — Supposons maintenant que, au lieu de faire agir un aimant sur le fer, on fasse agir les aimants les uns sur les autres, et considérons plusieurs aimants suspendus par leur centre de gravité, et auxquels on présente une même extrémité d'un autre aimant; on verra que certains pôles seront attirés, tandis que d'autres seront repoussés. Les pôles sur lesquels l'action est la même sont appelés *pôles de même nom*; ceux sur lesquels elle est différente, sont dits *de nom contraire.*

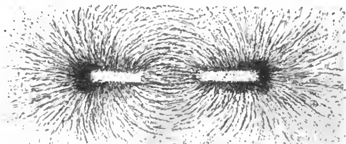


Fig. 868.

Une fois qu'on a distingué les pôles des deux espèces, on reconnaît que *les pôles de même nom se repoussent, et les pôles de nom contraire s'attirent.*

On remarque que les deux pôles opposés d'un même aimant sont de nom contraire; car l'un d'eux est attiré par le pôle de l'aimant pris pour terme de comparaison, tandis que l'autre est repoussé. Il en résulte que si l'on retourne bout à bout l'aimant que l'on fait agir sur les autres, les pôles qui étaient attirés seront repoussés, et réciproquement.

On désigne les deux pôles opposés d'un aimant, par les noms de *pôle positif* et *pôle négatif*, et on les indique par les signes + et — de l'algèbre. Ces noms sont relatifs; cependant, on peut désigner les pôles d'une manière absolue, en se fondant sur la propriété suivante, sur laquelle nous reviendrons avec détail (1202) : les aimants suspendus librement par leur milieu, prennent spontanément une direction à peu près parallèle au méridien, de manière que les pôles qui sont tournés du même côté soient tous de même nom. Dans chaque aimant, le pôle qui regarde le nord se nomme *pôle nord*, et celui qui regarde le sud, *pôle sud*. Nous conviendrons ici de prendre toujours pour pôle *positif*, celui qui se tourne vers le nord; le pôle sud sera alors le pôle *négatif*.

1195. Points conséquents. — Nous avons dit que les pôles situés aux extrémités d'un même aimant sont de nom contraire. Cependant il peut en être autrement; mais alors il y a, entre ces deux pôles, des pôles intermédiaires, auxquels on donne le nom de *points conséquents*. Les points conséquents se reconnaissent en roulant les aimants dans la limaille de fer (*fig.* 869). On peut encore former sur une feuille de carton un spectre magnétique, qui montre comment la limaille se porte vers les pôles intermédiaires, comme vers les pôles extrêmes. En faisant agir ces pôles sur une aiguille aimantée, on trouve qu'ils sont alternativement positifs et négatifs. Il en résulte que, s'il y a un nombre *pair* de points conséquents, les pôles extrêmes sont de nom contraire, comme en *mn*, et s'il y en a un nombre *impair*, les pôles extrêmes sont de même nom, comme en *ac*. On voit aussi qu'un aimant qui présente un ou plusieurs points conséquents, peut être considéré comme formé de plusieurs aimants placés les uns au bout des autres, et réunis par des pôles de même nom. Par exemple, l'aimant *ac* (*fig.* 869) peut être considéré comme formé de trois aimants, *m*, *o* et *n*, les deux premiers réunis par le pôle positif, et les deux autres, par le pôle négatif.



Fig. 869.

Différence entre les aimants et les corps magnétiques. — L'existence des pôles de nature différente dans les aimants, les distingue nettement des corps simplement magnétiques. En effet, tous les points de ces derniers attirent également les deux pôles d'un aimant, tandis que les aimants agissent différemment par leurs pôles opposés.

1196. De la cause des propriétés des aimants.—Les anciens, voulant, suivant leur habitude, deviner les causes avant d'étudier les effets, n'ont créé sur l'aimant, que des systèmes obscurs et inféconds. Quelques-uns se contentaient de dire que la cause des propriétés de l'aimant, cette pierre par excellence, ce chef-d'œuvre divin, comme ils l'appelaient, était un secret réservé par les dieux. Thalès et Anaxagore supposaient que l'aimant était animé, et capable de mouvoir le fer. Claudien prétend que le fer est la nourriture de l'aimant, opinion reprise plus tard par le médecin Costeo de Lodi et par Maurolycus. D'autres disaient qu'il y avait sympathie entre le fer et l'aimant. Diogène Laërce admet que l'aimant lance des émanations, qui s'enfoncent dans les interstices du fer et l'entraînent; il remarque que l'attraction est réciproque. Lucrèce et Plutarque pensaient que ces émanations faisaient le vide entre l'aimant et le fer, qui se précipitait dans ce vide. Tous ces systèmes ne sont que l'expression même du fait qu'il s'agit d'expliquer, déguisée sous une forme plus ou moins ingénieuse. G. Gilbert, que Galilée qualifie de « grand jusqu'à faire naître l'envie, » rejette tous ces jeux d'esprit, et, faisant appel à la méthode expérimentale, rectifie les faits connus, et en découvre un grand

nombre d'autres, qu'il publie dans son livre *De magnete*, se contentant d'essayer l'explication de quelques phénomènes particuliers, sans chercher à établir de théorie générale. Gassendi supposait que l'aimant lançait sur le fer des atomes en forme d'hameçon, pour l'accrocher et le tirer. Descartes avait recours à ses tourbillons. Porta regardait l'aimant comme formé de fer et de pierre en lutte perpétuelle, et l'aimant empruntait le secours du fer situé à proximité, pour empêcher la pierre d'être la plus forte. On voit que les inventeurs de tous ces systèmes n'ont fait faire aucun pas à la science; Gilbert seul, qu'on peut regarder comme le créateur de la science du magnétisme, l'a fait sortir de l'enfance dans laquelle elle était restée pendant un si grand nombre de siècles. Enfin, Æpinus, tenant compte de tous les phénomènes constatés par Gilbert et par lui-même, chercha à rattacher les propriétés des aimants à l'existence d'un fluide particulier renfermé dans les substances magnétiques, et attirant leurs molécules. On a ensuite admis deux fluides, puis Coulomb a établi la théorie que nous allons exposer.

1197. THÉORIE DES DEUX FLUIDES. — L'expérience prouve qu'on peut enlever à un aimant ses propriétés magnétiques, en le frottant convenablement avec un autre aimant, ou en l'échauffant fortement, ou enfin en le frappant simplement avec un marteau. Dans ces diverses opérations, la matière de l'aimant n'éprouve aucune modification, comme l'atteste l'analyse chimique la plus minutieuse, et son poids n'est pas changé. On a conclu de là que les propriétés magnétiques n'appartiennent pas en propre à la matière pondérable, et on les a attribuées à un fluide particulier.

Coulomb a ensuite avancé l'hypothèse suivante, qui est, pour ainsi dire, la traduction des phénomènes principaux, et se plie de la manière la plus heureuse à l'explication de tous ceux qui étaient connus de son temps. Il admet qu'il existe dans les aimants deux fluides impondérables qu'il nomme *fluides magnétiques*, exerçant leur effet, l'un au pôle positif, l'autre au pôle négatif. Chacun de ces fluides agit par répulsion sur le fluide de la même espèce, et par attraction sur le fluide de nom contraire ; ce qui explique les actions mutuelles des pôles. Ces fluides n'ont pu être isolés, et ne peuvent se manifester sans l'intervention de la matière pondérable.

Décomposition du fluide magnétique du fer. — Dans cette théorie, on explique les actions mutuelles des pôles par celles qu'exercent les fluides qu'ils contiennent. On est donc conduit naturellement à attribuer l'attraction des aimants sur le fer et les autres substances magnétiques, à une action exercée par le fluide attirant, sur un fluide de nom contraire qui existerait dans le corps attiré. C'est, en effet, ce qui paraît avoir lieu ; car, si l'on appuie l'extrémité d'un barreau de fer sur le pôle d'un aimant, ce barreau devient lui-même un aimant, et peut attirer de la limaille ou un autre barreau de fer. Ce dernier se trouve aussi aimanté, et peut de même attirer de la limaille. On peut ainsi suspendre à un aimant, une série de morceaux de fer, qui se soutiennent les uns les autres (*fig.* 870); c'est ce qu'on nomme la *chaîne magnétique*.

Mais si l'on vient à éloigner l'aimant, du morceau de fer supérieur, tous les autres tombent aussitôt. Cette expérience était connue de Platon; on voit que ce n'est que sous l'influence de l'aimant que les morceaux de fer sont constitués momentanément à l'état d'aimantation. On comprend aussi pourquoi la limaille de fer s'arrange en filaments (1193); c'est que chaque parcelle en attire une autre, de manière à former une multitude de petites chaînes magnétiques.

L'état d'aimantation d'un barreau de fer placé sur le prolongement d'un aimant peut aussi se reconnaître en formant le spectre magnétique, comme on le voit dans la *fig.* 871; on y distingue les pôles de l'aimant temporaire que forme le fer, et sa ligne neutre *ab*.

Pour expliquer ces résultats, Coulomb admet que tous les corps magnétiques contiennent les deux fluides, combinés de manière à ne produire aucun effet, et constituant ce qu'il nomme le *fluide magnétique neutre*. Quand on approche le pôle positif d'un aimant, le fluide neutre du fer est décomposé; le fluide négatif provenant de cette décomposition est attiré vers le pôle de l'aimant, et le fluide positif est repoussé. Le fer forme alors un aimant, dont le pôle négatif est attiré par le pôle positif de l'aimant proprement dit, plus que ne l'est le pôle opposé, à cause de la plus grande distance. Quand on éloigne l'aimant proprement dit, les fluides magnétiques séparés dans le fer par son influence, se recombinent, parce qu'ils s'attirent, et reforment du fluide neutre; tout signe d'aimantation disparaît donc.



Fig. 870.

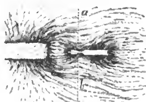


Fig. 871.



Fig. 872.

Une expérience curieuse, connue sous le nom de *paradoxe magnétique*, confirme cette manière de voir. On suspend un morceau de fer à l'un des pôles d'un aimant A (*fig.* 872), et l'on en approche peu à peu le pôle contraire d'un autre aimant B. On voit bientôt le morceau de fer se détacher et tomber; c'est que l'influence du pôle de l'aimant B, détruit la décomposition de fluides qu'avait produite le pôle de nom contraire de l'aimant A.

Citons encore l'expérience suivante : on suspend horizontalement, par des cordons verticaux parallèles, deux morceaux égaux de fil de fer, de manière qu'ils se touchent latéralement, et on approche de l'une de leurs extrémités le

pôle d'un aimant ; on voit aussitôt les deux brins de fil de fer s'écarter l'un de l'autre, parce qu'ils sont aimantés par influence, et que les pôles de même nom se trouvent du même côté.

1198. Des éléments magnétiques. — Avant Coulomb, on croyait que les fluides magnétiques occupaient chacun une des moitiés de l'aimant. Le fait suivant, découvert par Gilbert, montre qu'il n'en est pas ainsi : si l'on brise en deux une aiguille aimantée (*fig.* 879), chaque moitié devient un aimant complet ayant ses pôles et sa ligne moyenne. Chaque moitié, brisée de même, donne deux nouveaux aimants complets : en un mot, quelque petite que soit la parcelle que l'on sépare d'un aimant, elle présente deux pôles et une ligne moyenne. Pour expliquer ce résultat, on est forcé d'admettre, avec Coulomb, que les fluides magnétiques résident dans des espaces insensibles nommés *éléments magnétiques*, et qui sont disposés comme des aimants excessivement petits, ayant tous leurs pôles de même nom tournés du même côté, et leur axe dirigé parallélement à l'axe de l'aimant. Les fluides ne résident donc



Fig. 873.



Fig. 874.

pas séparément dans chaque moitié de l'aimant, mais on les y trouve l'un et l'autre. L'aimant est constitué comme une réunion de petits aimants élémentaires tous orientés de la même manière. On imite cet état des aimants, en remplissant un tube en carton, de trés petits aimants obtenus en brisant des fils d'acier aimantés. L'ensemble se comporte comme un aimant unique, si l'on a soin que les petits aimants, parallèles à l'axe du tube, aient leurs pôles positifs tournés du même côté. On peut encore, comme l'a fait de Haldat, remplir de limaille de fer, ou de battitures de fer pulvérisées, un tube de laiton fermé à ses extrémités par des tampons à vis en laiton. Si l'on aimante ce systéme par l'un des procédés dont on se sert pour aimanter les barreaux d'acier, il forme un aimant ayant ses deux pôles et sa ligne neutre. La pression plus ou moins forte, exercée au moyen des tampons à vis, ne change rien au résultat ; mais si l'on vient à déranger, par des secousses, les parcelles de limaille, la force de l'aimant diminue, et tout signe d'aimantation finit par disparaître. En mêlant du sable à la limaille, on peut encore aimanter le cylindre, même quand le volume du sable forme les $\frac{5}{6}$ du volume total. — On obtient des résultats semblables au moyen des *aimants factices* de Knight et de Ingenhousz. Ces aimants sont composés de diverses poudres ferrugineuses, dont on forme une pâte au moyen de quelque substance liante, comme une huile siccative, et que l'on aimante quand elle s'est durcie.

Il nous reste à expliquer comment les éléments magnétiques peuvent donner à l'aimant qu'ils forment deux pôles séparés et une ligne neutre : considérons

une seule file d'éléments magnétiques AB (*fig.* 874). Si ces éléments ne modifiaient pas mutuellement leur état magnétique, leurs effets sur un point extérieur se neutraliseraient dans toute la longueur de la file, excepté aux extrémités, où le fluide positif de A et le fluide négatif de B agiraient isolément. Mais les éléments magnétiques exercent les uns sur les autres des actions dont dépend l'état final. Considérons un élément *a*, tous les pôles positifs des éléments qui sont du côté B agiront plus fortement sur *a* que leurs pôles négatifs, qui sont plus éloignés. De même, les pôles négatifs de tous les éléments qui sont du côté A auront sur *a* une action plus forte que les pôles positifs. Les deux parties B*a*, *a*A de la série tendront donc à augmenter la force magnétique de l'élément *a* en y décomposant du fluide magnétique neutre. Il est facile de voir que la force magnétique des éléments augmente des extrémités au milieu. En effet, l'élément situé à la gauche d'un élément *a*, pris dans la moitié B de l'aimant, est soumis à l'action d'un élément de moins situé à l'extrémité de gauche, mais il reçoit celle d'un élément de plus placé à l'extrémité de droite; et comme ce dernier élément est plus rapproché de l'élément considéré que celui de gauche, on voit que l'effet total est plus grand que celui que subit l'élément *a*, qui est plus près de l'extrémité B. La force magnétique diminue donc, du milieu aux extrémités; il en résulte que les actions des pôles en regard, de deux éléments consécutifs, sont différentes. Ainsi, dans la moitié B, l'intensité du fluide négatif d'un élément l'emporte sur celle du fluide positif de l'élément situé à sa droite, de manière que les actions du fluide négatif dominent dans la moitié B. De même, les actions du fluide positif dominent dans la moitié A.

En soumettant au calcul les effets des divers éléments les uns sur les autres, et admettant que les intensités des forces magnétiques varient en raison inverse des carrés des distances, comme nous le verrons plus loin (1211), Poisson a démontré que la somme des actions que reçoit un élément de la part de tous les autres, diminue du milieu aux extrémités, d'abord lentement, puis très rapidement. Il en résulte que la différence entre les forces magnétiques de deux éléments voisins, et par conséquent entre leurs pôles les plus rapprochés, augmente à mesure qu'on s'avance vers les extrémités. Or, c'est cette différence qui agit à l'extérieur; la force magnétique augmente donc rapidement du milieu aux extrémités. Vers le milieu, les différences de force magnétique sont à peine sensibles, et les effets extérieurs peu prononcés, quoique les éléments soient plus aimantés que près des extrémités. Nous verrons que l'expérience confirme tous ces résultats (1216).

1199. Pôles mathématiques d'un aimant. — Considérons un centre magnétique, contenant, par exemple, du fluide *positif*, et situé à une distance assez grande d'un aimant pour que les droites menées de ce centre aux différents points de l'aimant puissent être regardées comme parallèles. Chacun des points de la moitié *négative* de l'aimant est attiré, et d'autant plus fortement qu'il est plus rapproché de l'extrémité. Toutes les attractions parallèles ont une résultante, dont le point d'application est situé dans l'intérieur de l'aimant,

à une certaine distance de l'extrémité. Ce point d'application se nomme *pôle* de l'aimant. Il existe un pôle semblable dans l'autre moitié, qui est le point d'application de la résultante des forces *répulsives* exercées sur le centre magnétique considéré. On voit que le mot *pôle* reçoit ici un sens différent de celui que nous lui avons donné jusqu'à présent.

Si nous considérons un centre magnétique peu éloigné, les forces ne seront plus parallèles, et les points d'application des résultantes n'auront plus les mêmes positions. Ces positions dépendront de la situation et de la distance du centre magnétique. En outre, ce dernier pourra modifier l'état magnétique de l'aimant en en augmentant la force, et rapprochant la ligne neutre de son côté. Quand on parle des pôles d'un aimant, on suppose toujours que le corps magnétique sur lequel il agit, ou qui agit sur lui, est assez éloigné pour que les actions sur les différents points puissent être regardées comme parallèles.

1200. Les fluides magnétiques ne se transportent pas. — Quand le fer est soumis à l'action d'un aimant, les fluides positif et négatif provenant de la décomposition du fluide neutre, ne se transportent pas aux extrémités, mais la décomposition se fait dans chaque élément magnétique. En effet, si l'on sépare avec des cisailles, une partie d'un brin de fil de fer suspendu à un aimant, le fragment qui se détache se trouve à l'état neutre ; ce qui prouve que ce fragment contenait des quantités égales des deux fluides, quoique l'action du fluide de même nom que celui du pôle le plus rapproché de l'aimant y prédominât. — En outre, le fluide magnétique ne peut sortir des aimants, pas plus que des substances simplement magnétiques ; car les aimants peuvent, sans perdre de leur force, communiquer leurs propriétés aux corps susceptibles d'être aimantés.

Dans la théorie de Coulomb, on admet que la quantité de fluide neutre contenu dans les corps magnétiques est indéfinie. Mais nous verrons qu'il y a, dans certains cas, une limite maximum, et nous ferons connaître une autre théorie, établie par Ampère, dans laquelle on montre que les propriétés des éléments magnétiques sont dues à l'électricité disposée d'une manière particulière (v. ch. VI).

1201. Force coërcitive. — Les fluides magnétiques séparés dans un barreau de fer par l'influence d'un aimant, se recomposent dès que cet aimant est éloigné, à cause de l'attraction qu'ils exercent l'un sur l'autre. Si, malgré cette attraction, il n'en est pas de même dans les aimants, il faut évidemment qu'il existe dans ceux-ci une cause particulière qui s'oppose à la recomposition des fluides. Cette cause inconnue a reçu le nom de *force coërcitive*. Le caractère de cette force est de s'opposer, dans les éléments magnétiques, au mouvement des fluides tendant soit à les séparer, soit à les réunir après la séparation. La force coërcitive dépend à la fois de la nature du corps magnétique et de l'arrangement de ses molécules. On peut dire, en général, que tout ce qui augmente la dureté augmente aussi cette force. L'acier recuit ne possède pas de force coërcitive ; mais quand on le trempe, il devient dur et cassant,

et en même temps il acquiert une force coërcitive d'autant plus prononcée qu'il est plus fortement trempé. Le *fer doux* n'a pas de force coërcitive ; mais si l'on vient à l'écrouir par la compression, par la torsion... ; s'il est rendu cassant en y mélangeant un peu de soufre, de phosphore, d'arsenic, de charbon, il reste aimanté après qu'on l'a soumis à l'influence du pôle d'un aimant. La force coërcitive est encore modifiée instantanément par le choc : ainsi, il suffit de laisser tomber un aimant pour lui faire perdre une notable partie de sa force ; on peut lui enlever toute son aimantation au moyen d'un coup de marteau. D'un autre côté, si l'on soumet une barre de fer à l'action d'un aimant, et qu'on la frappe par le bout, d'un coup sec, elle reste aimantée ; le choc a développé, au moins pour quelque temps, de la force coërcitive. Enfin, la chaleur fait céder la force coërcitive, car elle affaiblit les aimants, et l'on peut même leur enlever toute trace d'aimantation en les chauffant fortement.

L'attraction d'un aimant sur un corps simplement magnétique, devant être précédée d'une décomposition de fluide neutre, un aimant doit être sans action sur un corps dans lequel la force coërcitive s'oppose à cette décomposition. C'est, en effet, ce qui a lieu : ainsi, un morceau d'acier fortement trempé n'est pas attiré par un aimant. Cependant, si l'aimant est trés puissant, comme la force coërcitive est limitée, ainsi que toutes les forces de la nature, elle peut céder, et le fluide neutre se décomposer plus ou moins lentement ; mais quand l'aimant a été éloigné, cette décomposition persiste, et l'acier reste aimanté.

Quand on fait agir un pôle d'un aimant puissant sur le pôle de même nom d'un petit aimant, il peut se faire que ce dernier, au lieu d'être repoussé, soit attiré. Ce fait, en apparence contradictoire, s'explique par la décomposition qui se fait dans le fluide neutre du petit aimant, dont la force coërcitive est vaincue, de manière qu'il y a, du côté du pôle du fort aimant, dans chaque élément magnétique, plus de fluide contraire provenant de cette décomposition, qu'il n'y avait d'avance de fluide de même nom. Tantôt le petit aimant reste aimanté dans le même sens, aprés qu'on a enlevé le fort aimant ; seulement le pôle sur lequel on a agi se trouve affaibli ; tantôt le sens de l'aimantation est renversé, quand l'aimant que l'on emploie est trés puissant. D'autres fois enfin, quand le petit aimant est très effilé, il se forme un point conséquent, à une petite distance. M. Woestyn, qui a étudié particulièrement ces phénoménes[1], les explique en admettant que la force coërcitive n'existe pas dans tous les éléments ; ce qui se conçoit, puisque la trempe se fait sentir autrement à la surface et dans l'intérieur des barreaux, et que l'acier n'est pas homogène, des parcelles étant plus carburées que d'autres.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXVI, p. 520.

§ 2. — ACTION DE LA TERRE SUR LES AIMANTS.

1202. Déclinaison. — Un aimant suspendu horizontalement par son milieu sur un pivot ou dans un étrier en papier, se dirige spontanément de manière qu'une de ses extrémités soit tournée vers le nord, et l'autre vers le sud. Ce résultat se vérifie en tout lieu, excepté, comme nous le verrons, en quelques points voisins des pôles terrestres. Pour ces sortes d'observations, on emploie de préférence de petits aimants minces et allongés connus sous le nom d'*aiguilles aimantées*. On a cru pendant longtemps que l'axe de l'aiguille aimantée se plaçait exactement dans le méridien géographique ; mais il n'en est pas ainsi, et l'on a donné le nom de *déclinaison* à l'angle que fait avec le méridien du lieu, le plan vertical qui passe par l'axe de l'aiguille, plan qui s'appelle *méridien magnétique*.

La déclinaison n'est pas la même à tous les points de la surface du globe. L'extrémité nord de l'aiguille se trouve tantôt à l'est, tantôt à l'ouest du méridien du lieu, ce que l'on indique en disant que la déclinaison est *orientale* ou *occidentale*. Il y a aussi des points pour lesquels la déclinaison est nulle; ils forment des lignes continues nommées *lignes sans déclinaison* ; nous verrons plus loin comment on les détermine et quelle est leur forme.

La déclinaison éprouve en un même lieu des variations que nous étudierons à part (1244). On distingue : 1° les *variations séculaires*, qui consistent en oscillations dont chacune dure des siècles, et qui entraînent le pôle nord de l'aiguille aimantée de part et d'autre du méridien. En 1663, la déclinaison était nulle à Paris; une des lignes sans déclinaison passait donc par cette ville ; 2° les *variations diurnes*, qui sont des mouvements oscillatoires d'une amplitude moindre que 1° ; 3° les *variations accidentelles* ou *perturbations*, qui sont aussi très petites, et dont nous chercherons les causes.

La déclinaison a été découverte par Colomb, en 1492, lors de son voyage à la recherche de l'Amérique, et ce phénomène inattendu ne contribua pas peu à augmenter l'hésitation de ses compagnons, qui voyaient leur guide habituel sur les mers manquer à son exactitude accoutumée. Cependant, Thévenot assure avoir vu une lettre écrite en 1269 par Pierre Adsiger, dans laquelle il était dit que l'aiguille aimantée faisait un angle de 5° avec la méridienne. Delisle, le géographe, possédait un manuscrit dédié à Sébastien Cabot par un pilote de Dieppe nommé Crignon, dans lequel il était question de la déclinaison. Cabot passe souvent pour en avoir fait le premier la découverte, vers 1500.

1203. Inclinaison. — Supposons qu'on suspende, *par son centre de gravité*, une aiguille d'acier non aimantée, mobile dans tous les sens autour de ce point, elle restera en équilibre dans quelque position qu'on la mette. Si l'on vient ensuite à l'aimanter, on la verra se placer dans le méridien magnétique en

s'inclinant fortement sur l'horizon. Ce résultat peut être facilement observé au moyen de l'*aiguille libre* (*fig.* 875). Cette aiguille peut tourner autour d'un axe horizontal, *oo'*, passant par son centre de gravité et appuyé sur les branches d'une fourchette renversée suspendue à un fil de soie sans torsion *c*. De cette façon, l'aiguille peut prendre toutes les positions sans jamais rencontrer d'obstacle. On nomme *angle d'inclinaison*, le plus petit des angles que fait avec l'horizon, l'aiguille aimantée mobile dans le méridien magnétique autour d'un axe passant par son centre de gravité. L'aiguille ainsi disposée se nomme *aiguille d'inclinaison*.

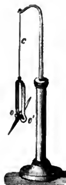


Fig. 875.

L'inclinaison a été découverte à Londres en 1576 par Robert Norman, fabricant d'instruments de marine. Il reconnut qu'une aiguille suspendue horizontalement sur un pivot avant d'être aimantée, prenait une position inclinée, après l'aimantation. Ce fait avait été fréquemment observé, mais on l'avait toujours attribué à un déplacement du centre de gravité produit pendant l'aimantation. Cependant l'aiguille d'inclinaison, dans nos climats, est bien plus prés de la verticale que de l'horizontale. C'est en cherchant quel poids il fallait ajouter pour que l'aiguille reprît sa position horizontale, et après avoir trouvé que ce poids était d'autant plus grand que la latitude était plus élevée, que Norman découvrit l'inclinaison.

L'inclinaison éprouve des variations séculaires et diurnes, et des perturbations, analogues à celles de la déclinaison, mais moins prononcées.

L'inclinaison n'est pas la même, à une même époque, aux différents points de la surface du globe. Dans notre hémisphère, c'est l'extrémité nord de l'aiguille aimantée qui plonge vers la terre; son axe fait avec l'horizon un angle de 66° environ. A mesure qu'on se rapproche du pôle, on voit augmenter l'inclinaison. Si, au contraire, on marche vers l'équateur, on la voit diminuer; et prés de cette ligne, on trouve un point où l'aiguille se tient horizontale. Si l'on dépasse ce point, en marchant vers le sud, l'inclinaison reparaît; mais c'est alors l'extrémité sud de l'aiguille qui s'abaisse vers le sol, et de plus en plus à mesure qu'on se rapproche du pôle austral de la terre.

Equateur magnétique; pôles magnétiques. — Sur chaque méridien, il y a un point où l'inclinaison est nulle: tous les points où cette particularité se présente forment une courbe continue, s'écartant peu de l'équateur géographique, qu'elle coupe en plusieurs points; on la nomme *ligne sans inclinaison* ou *équateur magnétique*. Prés des pôles terrestres, il y a des points où l'aiguille aimantée se place verticalement. On les nomme *pôles magnétiques* de la terre.

Nous considérerons en particulier la déclinaison et l'inclinaison, quand nous étudierons les lois du magnétisme terrestre, et nous décrirons alors les instruments destinés à mesurer avec exactitude la grandeur de ces angles.

1204. La terre agit comme un aimant. — Dès qu'on eut découvert la direction que prend spontanément l'aiguille aimantée, on chercha à l'expliquer. Les uns admettaient un centre d'attraction situé au-delà des étoiles, dans la direction du pôle de la sphère céleste, ou du pôle de l'écliptique. Cardan croyait que la force directrice émanait d'une petite étoile de la queue de la Grande-Ourse. Descartes supposait un tourbillon de matière subtile allant du sud au nord et passant à travers les pores de l'aimant, dont les molécules étaient branchues et résistaient plus dans une direction que dans l'autre. Gilbert, longtemps auparavant, avait donné une explication qui aurait dû entraîner tous les suffrages. Elle consiste à considérer la terre comme un aimant gigantesque dont la ligne neutre est à l'équateur magnétique, et dont les pôles sont situés dans les zones glaciales. Voici les expériences qui viennent à l'appui de cette manière de voir :

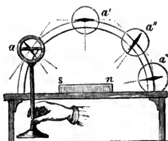


Fig. 876.

1° Une aiguille aimantée placée sur un aimant, se dirige suivant la ligne des pôles de ce dernier, de manière que les pôles de nom contraire soient en regard ; de même qu'elle se dirige du nord au sud quand elle est abandonnée à elle-même.

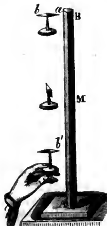


Fig. 877.

2° On place un aimant *sn* (*fig.* 876) au centre et dans le plan d'un demi-cercle qui représente un méridien terrestre, et l'on porte une aiguille aimantée *a* aux différents points de ce demi-cercle, dans le plan duquel elle est mobile ; on la voit faire des angles de plus en plus petits avec la tangente à la circonférence, quand, partant de *a*, elle s'approche de la position *a'*, où elle se confond avec la tangente ; puis elle s'incline de plus en plus par le pôle de nom contraire au pôle *n*, comme on le voit en *a"*, et finit par se confondre, en *a'''*, avec la normale à la circonférence. En assimilant la tangente, au plan de l'horizon terrestre, on voit qu'on a une imitation des variations qu'éprouve l'aiguille d'inclinaison, quand on la transporte sur un méridien.

3° **Action de la terre sur le fer.** — Les aimants ont la propriété de décomposer le magnétisme neutre du fer doux ; si donc la terre se comporte comme un aimant, elle doit aussi agir sur le fer. C'est, en effet, ce qui a lieu : si l'on dresse verticalement une barre de fer AB (*fig.* 877), elle devient un aimant, dont le pôle nord se trouve

au bas. On le reconnaît en approchant une aiguille aimantée *ab*; on voit son pôle nord attiré par les parties supérieures de la barre, et repoussé par les parties inférieures, tandis que en M, devant la ligne neutre, elle reste indifférente. Cet état magnétique de la barre ne provient pas d'une aimantation permanente qu'elle pourrait posséder accidentellement ; car, si on la retourne bout à bout, elle présente encore un pôle nord à sa partie inférieure. Dans l'hémisphère austral, elle prendrait un pôle sud en bas. Si l'on frappe d'un coup de marteau, l'extrémité de la barre pendant qu'elle est verticale, elle conserve pendant quelque temps son état d'aimantation, le choc développant de la force coërcitive (1201). Pour avoir le maximum d'effet, il faudrait placer la barre dans le méridien magnétique parallèlement à l'aiguille d'inclinaison qui indique, comme nous allons le voir, la direction magnétique terrestre.

Toutes les barres de fer verticales, les tiges des paratonnerres, les espagnolettes, les tuyaux de poêle en tôle, sont aussi aimantées par l'influence terrestre. L'acier trempé lui-même peut prendre un état d'aimantation temporaire sous cette influence, comme l'a remarqué M. Barlow ; ce qui s'explique facilement dans l'hypothèse de M. Woestyn (1201). Les outils en acier, suspendus verticalement dans les ateliers, sont presque toujours aimantés ; les ébranlements auxquels ils sont soumis quand on en fait usage, font céder la force coërcitive, de manière que du fluide neutre est décomposé par l'influence du globe.

Les expériences qui précèdent sont dues à Gilbert. Il rapporte que l'aimantation des barres de fer verticales a été découverte, à Mantoue, sur la tige de la girouette du couvent des Augustins. L'aimantation permanente du fer a été observée pour la première fois, à Rimini, sur une barre placée au haut d'une tour de l'église Saint-Augustin, par le chirurgien J.-César. En 1630, Gassendi constata qu'une croix tombée de vétusté du haut du clocher de l'église Saint-Jean, à Aix, était aimantée ; la rouille qui en recouvrait le pied l'était surtout fortement. Le magnétisme des aimants naturels est probablement dû à l'action prolongée du globe. Il serait curieux de vérifier si, dans notre hémisphère, le pôle nord de ces aimants se trouve en bas, avant qu'on ne les détache de la roche, et en haut, dans l'hémisphère austral.

1205. Pôle austral et pôle boréal des aimants. — La terre se comportant comme un aimant dont la ligne neutre serait l'équateur magnétique, on a donné le nom de *fluide boréal* à celui qui domine au pôle boréal, et le nom de *fluide austral* à celui qui domine dans l'autre pôle. Comme les fluides de nom contraire s'attirent, on doit admettre que le fluide qui agit au pôle *nord* d'un aimant est du fluide *austral*, et que celui qui agit au pôle *sud*, est du fluide *boréal*. De là l'usage où l'on est, principalement en France, d'appeler le *pôle nord* d'un aimant *pôle austral*, et le *pôle sud*, *pôle boréal*. Ces expressions sont en apparence contradictoires ; mais les mots pôle nord et pôle sud s'appliquent aux points qui regardent le nord et le sud ; ils expriment simplement le fait, et sont indépendants de toute théorie, tandis que les termes *pôle austral*

et *pôle boréal* désignent la nature des fluides qui dominent dans les diverses parties de l'aimant, et supposent que l'on admet la théorie de Coulomb. Comme cette théorie a été modifiée depuis la découverte de l'électro-magnétisme, et pour éviter toute confusion, nous continuerons de désigner par les mots *nord* et *sud* ou par les signes + et —, les pôles qui se tournent du côté du *nord* et du *sud*.

1206. L'ACTION DE LA TERRE SUR UN AIMANT NE PEUT QUE LE DIRIGER. — Soit *o*, *o'* (*fig.* 878) les pôles mathématiques d'une aiguille aimantée mobile dans le méridien magnétique. En *o* est appliquée une force attractive *ob*, et en *o'* une force répulsive *o'b'*, provenant des actions magnétiques de l'hémisphère terrestre qui se trouve du côté du pôle *o*. Ces deux forces sont égales et parallèles,

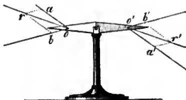


Fig. 878.

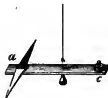


Fig. 879.

car la longueur *oo'* est insensible par rapport à la distance au point d'où elles émanent, et les deux moitiés de l'aiguille aimantée renferment les mêmes quantités de fluides libres, puisque ces fluides formeraient du magnétisme neutre en se combinant. De même l'hémisphère qui se trouve du côté de *o'* donne deux forces *o'a'*, *oa* égales, parallèles et de sens contraire. Les forces appliquées aux pôles *o* et *o'* peuvent se remplacer par les deux résultantes *or*, *o'r'*, qui sont évidemment égales, parallèles et en sens contraire, et forment par conséquent un couple (I, 67). Ce couple a pour effet de faire tourner l'aiguille dans le plan qu'elle peut décrire, jusqu'à ce que la ligne *oo*, se trouve dans la direction des forces *or*, *o'r'*, direction qui ne change pas pendant le mouvement.

Un couple ne pouvant que faire tourner le système auquel il est appliqué, on voit que l'action magnétique de la terre ne peut imprimer à un aimant aucun mouvement de translation. Ce résultat peut se vérifier par l'expérience. D'abord, pour montrer que l'action terrestre ne donne pas de composante verticale, on suspend un petit barreau d'acier au bassin d'une balance que l'on met en équilibre ; on aimante ensuite ce barreau, et l'on constate que l'équilibre a toujours lieu, dans quelque position qu'on le place. Il n'y a pas non plus de composante horizontale, car un aimant placé sur un morceau de liége flottant sur l'eau, tourne sur lui-même pour se placer dans le méridien magnétique, mais ne se transporte pas ; une aiguille aimantée *a* (*fig.* 879), posée horizontalement sur une bande de bois *ac* suspendue à un fil sans torsion, se place

exactement dans le méridien magnétique, quelle que soit sa position sur la bande de bois. Enfin, si l'on suspend une aiguille aimantée à un long fil, ce fil reste exactement vertical. On conclut de là qu'il ne peut pas y avoir de résultante unique dirigée obliquement à l'horizon, car cette force pourrait se décomposer en deux autres, l'une horizontale et l'autre verticale, et nous venons de voir que de semblables composantes n'existent pas.

1207. Position de l'aiguille d'inclinaison dans les différents azimuts. — L'aiguille d'inclinaison mobile dans le méridien magnétique fait connaître, quand elle est en équilibre, la direction de l'action de la terre. L'angle qu'elle fait alors avec l'horizon est le plus petit possible; car si l'on fait tourner autour de la verticale le plan dans lequel elle se meut, on la voit s'incliner de plus en plus, et devenir verticale quand ce plan est perpendiculaire au méridien magnétique. Pour expliquer ces résultats, soit *oab* (*fig.* 880) le méridien magnétique, *ob* l'axe de l'aiguille aimantée dans ce plan, et *ocb* un plan horizontal. Décrivons une circonférence horizontale sur *ab* comme diamètre; lorsqu'on fera tourner le plan vertical dans lequel se meut l'aiguille, autour de la verticale *oa* qui passe par son centre de gravité, son axe formera toujours une des arêtes du cône *oacbe*. En effet, soit *oac* une des positions du plan qui contient l'aiguille; il est facile de voir que cette aiguille sera en équilibre quand son axe sera dirigé suivant *oc*. Car la force terrestre est dirigée suivant *cf* parallèle à *ob*; cette force, comprise dans le plan du triangle *ocb*, peut se décomposer en deux autres, l'une dirigée suivant le prolongement de *oc*, et l'autre suivant *cb*. La première composante est détruite par la résistance de l'axe de suspension *o*, et *cb* ne peut avoir d'effet pour faire mouvoir l'aiguille dans le plan *oac*, puisque cette composante est perpendiculaire à ce plan, comme étant perpendiculaire à la fois à *oc* et à *ac*; l'angle *acb* étant inscrit dans la demi-circonférence, et le point *a* étant le pied de la perpendiculaire abaissée du point *o* sur le plan *acb*. La composante *cb* ferait au contraire mouvoir l'aiguille si son axe rencontrait *ac* en un point qui ne serait pas sur la circonférence *acb*; car on pourrait la décomposer en deux forces, l'une perpendiculaire au plan *oac*, l'autre nécessairement oblique, qui ferait mouvoir l'aiguille. Cette aiguille prendra donc d'elle-même la direction *oc*.

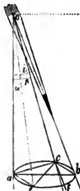


Fig. 880.

Il résulte de là que l'angle *aob*, dans le méridien magnétique, est maximum, et par conséquent que l'angle d'inclinaison, qui en est le complément, est minimum. Dans le plan perpendiculaire à *oab*, plan tangent au cône *oacbe*, l'axe de l'aiguille prend la direction *oa*. Il est facile de voir directement que, dans cette position, elle est en équilibre.

Quand on voudra mesurer l'angle d'inclinaison, on pourra, en faisant

tourner autour d'un axe vertical le plan dans lequel se meut l'aiguille, chercher par tâtonnement la position dans laquelle elle fait le plus petit angle avec l'horizontale; ou bien on pourra d'abord placer ce plan de manière que l'aiguille soit verticale, puis le faire tourner de 90°, et l'angle que fera alors l'aiguille avec l'horizon sera encore l'angle d'inclinaison.

Dans cette manière de procéder, il y a un peu d'incertitude; car, au moment où l'inclinaison atteint sa valeur maximum ou sa valeur minimum, la composante qui sollicite l'aiguille est très faible, de sorte que le moindre frottement sur son pivot l'empêche de prendre sa véritable direction. On peut éviter cet inconvénient, en faisant deux observations, dans deux plans perpendiculaires entre eux et éloignés des positions où l'inclinaison est maximum ou minimum. En effet, soient *oac*, *oae* ces deux plans. Dans le triangle rectangle *cae*, on aura $\overline{ec}^2 = \overline{ab}^2 = \overline{ac}^2 + \overline{ae}^2$. Les triangles *oab*, *oac*, *oae* donnent $ab = \overline{oa}$ tang i, $ac = \overline{oa}$ tang β, $ae = \overline{oa}$ tang α. L'équation devient donc, si l'on supprime le facteur commun $\overline{oa}^2$.

$$\text{tang}^2\, i = \text{tang}^2\, \beta + \text{tang}^2\, \alpha; \qquad \text{d'où} \qquad \cot \mathrm{I} = \sqrt{\cot^2 a + \cot^2 b},$$

en représentant par I, a, b les compléments des angles i, α, β.

Conséquences. 1° On peut, au moyen des angles α et β, trouver la position du méridien magnétique, en déterminant l'angle *cab* qu'il fait avec le plan *oac*. En effet, les triangles rectangles *bca*, *bea* donnent $\overline{ac} = \overline{ab} \cos \overline{cab}$, et $\overline{ae} = \overline{ab} \cdot \cos \overline{eab} = \overline{ab} \cdot \sin \overline{cab}$. Remplaçant *ac* et *ae* par leurs valeurs ci-dessus, et divisant ces deux égalités membre à membre, il vient $ac : ae = \text{tang}\, \overline{cab}$, ou $\text{tang}\, \overline{cab} = \text{tang}\, \beta : \text{tang}\, \alpha$.

2° Coulomb a reconnu que, pour maintenir l'aiguille horizontale, ou plus généralement dans une position faisant un angle constant avec l'horizon, il faut la charger d'un même poids à l'extrémité sud, quel que soit l'azimut dans lequel elle peut se mouvoir. Ce résultat peut se trouver par le calcul; en effet, quand l'aiguille est horizontale, la force terrestre f donne deux composantes, l'une horizontale qui est détruite, l'autre verticale égale à $f \sin \mathrm{I}$, puisque la force f fait un angle égal à $90° - \mathrm{I}$ avec la verticale; et cette composante est indépendante de la position du plan vertical de l'aiguille.

1208. Aiguilles astatiques. — On nomme *aiguille astatique* une aiguille aimantée qui n'est pas influencée par le magnétisme terrestre. On peut rendre une aiguille aimantée astatique, en disposant dans le méridien magnétique, un aimant dont le pôle le plus rapproché de l'aiguille exerce sur elle une action opposée à celle du magnétisme terrestre. En éloignant plus ou moins cet aimant, on finit par rendre l'aiguille indifférente. L'aimant doit être assez fort pour agir à une grande distance, afin que la différence de distance des deux pôles de l'aiguille étant insensible dans toutes ses positions, l'action de l'aimant forme un couple à forces constantes. Si l'aimant était trop rapproché, il pourrait aussi modifier l'état magnétique de l'aiguille.

On obtient encore un système *astatique* au moyen de deux aiguilles identiques et de même force magnétique *ab*, *a'b'* (*fig.* 881), réunies l'une à l'autre par une tige rigide *n* et dont les pôles opposés sont tournés du même côté. Il est évident que les actions de la terre sur les deux aiguilles se contrebalancent. Si l'une d'elles, *ab*, est plus faible que l'autre, on l'incline de manière à la rapprocher de la direction de l'aiguille d'inclinaison, ce qui augmente la composante horizontale de l'action terrestre, et l'on parvient par tâtonnement à rendre le système indifférent à cette action.



Fig. 882. — 1/5.

Ampère a construit une aiguille astatique, en plaçant le plan dans lequel elle peut tourner, perpendiculairement à l'aiguille d'inclinaison, c'est-à-dire à la force magnétique terrestre. La *fig.* 882 représente l'aiguille astatique d'Ampère; elle tourne autour d'un axe perpendiculaire au plan d'un cercle divisé. Ce cercle est fixé à une petite roue dentée verticale *r*, que l'on peut faire tourner au moyen d'une vis sans fin *vv'*. Le support de la roue *r* est lui-même porté par un disque horizontal *s*, que l'on fait tourner sur lui-même en agissant sur la vis sans fin *u*. Au moyen de ce double mouvement, on dirige par tâtonnement le plan du cercle que parcourt l'aiguille, perpendiculairement à la force magnétique terrestre.

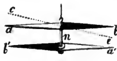


Fig. 881.

1209. MESURE DE LA FORCE MAGNÉTIQUE DU GLOBE. — Pour achever d'établir la théorie de l'aimant terrestre, il nous reste à montrer que l'intensité de la force magnétique du globe augmente à mesure qu'on se rapproche de l'un ou de l'autre pôle. Graham, le premier, s'est occupé d'évaluer cette intensité, en 1722. Plus tard, Saussure fit quelques expériences comparatives sur le mont Blanc et à Genève. Mais c'est à Borda que l'on doit les premières expériences suivies sur ce sujet, et la méthode qu'emploient aujourd'hui les voyageurs. Cette méthode consiste à faire osciller une même aiguille aux différents lieux dont on veut comparer les forces magnétiques. On peut procéder, soit au moyen de l'aiguille d'inclinaison, soit au moyen de l'aiguille de déclinaison.

1° Oscillations de l'aiguille d'inclinaison. — Si l'on dérange de sa position d'équilibre, *de* 3° *à* 4° *au plus*, une aiguille aimantée mobile dans le méridien magnétique, elle fait des oscillations sous l'influence des forces appliquées à ses deux pôles, forces qui restent toujours égales et parallèles dans toutes les positions qu'elle prend. Les oscillations sont donc soumises aux mêmes lois que celles du pendule; en effet, l'observation montre qu'elles sont isochrones quand elles sont suffisamment petites (I, 118). Les forces magnétiques qui font osciller l'aiguille sont donc proportionnelles aux carrés des nombres

d'oscillations accomplies pendant un même temps. En désignant donc par n et n' les nombres d'oscillations faites pendant le même temps, par une même aiguille dans deux pays différents, et par F et F' les forces magnétiques du globe en ces deux points, on aura

$$F : F' = n^2 : n'^2.$$

Cette manière de procéder exige de nombreuses précautions : d'abord, il faut que l'aiguille conserve exactement son état magnétique pendant toute la durée du voyage. C'est pourquoi on la transporte dans un étui rembourré, pour la préserver de toute espèce de choc, et l'on évite qu'elle subisse des variations brusques de température qui influeraient sur la force coërcitive (1201). On a soin aussi d'emporter plusieurs aiguilles, qui se contrôlent mutuellement, et qui doivent donner les mêmes rapports entre les intensités, si elles conservent leur état magnétique. Enfin, on revient au point de départ, et l'on y répète les expériences ; on doit retrouver les mêmes nombres d'oscillations si l'état magnétique des aiguilles n'a pas changé. L'aiguille doit être suspendue bien exactement par son centre de gravité, sans cela sa position d'équilibre ne correspondrait pas à la direction de la force magnétique terrestre. Pour s'assurer que cette condition est bien remplie, on mesure l'inclinaison, puis on aimante l'aiguille en sens inverse, de manière que l'extrémité qui plongeait vers la terre soit celle qui se relève ; si le centre de gravité est mal placé, on trouve alors un angle d'inclinaison différent. Il est évident que ces épreuves doivent se faire avant de commencer la série des expériences, pendant lesquelles on doit bien se garder de rien changer à l'état magnétique de l'aiguille.

1210. 2° Oscillations de l'aiguille de déclinaison. — L'aiguille de déclinaison est horizontale, et n'a pas la direction de la force magnétique du globe. Nous supposerons donc cette force F décomposée en deux autres, l'une verticale, détruite par la suspension de l'aiguille, l'autre f horizontale, parallèle au méridien magnétique, et sous l'influence de laquelle se font les oscillations. En appelant i l'angle d'inclinaison au lieu d'observation, nous aurons $f = F \cos i$, et il suffira de mesurer f et i pour connaître F. Les oscillations sont isochrones, comme pour l'aiguille d'inclinaison, quand l'amplitude ne dépasse pas 3 ou 4° ; ce qui montre que la composante efficace de f est alors proportionnelle à l'angle que fait l'aiguille avec sa position d'équilibre. C'est, du reste, ce que Coulomb a constaté par l'expérience : il suspendit une aiguille à un fil métallique très fin, et en tordant ce fil il écarta l'aiguille du méridien magnétique. La composante de la force f, qui tendait à l'y ramener, était alors égale à la force de torsion, et par conséquent proportionnelle à l'angle de torsion. Et cet angle s'est toujours trouvé proportionnel à l'angle que faisait l'aiguille avec le méridien magnétique, quand ce dernier ne dépassait pas 4°. Pour des angles plus grands, l'angle de torsion était proportionnel à leur

sinus. Ces expériences se font avec la balance de torsion que nous décrirons plus loin (1212).

Cela posé, on fait osciller l'aiguille horizontale en différents lieux, et l'on compte les oscillations accomplies pendant un certain temps. Soient n et n' ces nombres pour deux stations différentes, i et i' les inclinaisons, et F, F' les intensités magnétiques cherchées, en ces deux stations ; on aura

$$\frac{n^2}{n'^2} = \frac{f}{f'} = \frac{F \cos i}{F' \cos i'}, \qquad \text{d'où} \qquad \frac{F}{F'} = \frac{n^2 \cos i'}{n'^2 \cos i}.$$

L'emploi de l'aiguille de déclinaison offre des avantages sur celui de l'aiguille d'inclinaison. Cette dernière est difficile à construire, et, malgré tous les soins, le frottement sur son axe est toujours sensible ; tandis que l'aiguille de déclinaison peut être suspendue d'une manière très mobile par un fil de soie sans torsion, comme on le voit dans l'appareil suivant, connu sous le nom de ***boussole des intensités***, et qui a été imaginé par Hansten, et perfectionné par M. Duperrey.

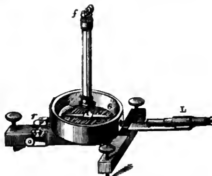


Fig. 883.

Boussole des intensités. — L'aiguille aimantée est suspendue dans une boîte cylindrique en bois (*fig.* 883) par un fil sans torsion. Cette boîte est fermée en dessus par une glace percée en son milieu. A l'ouverture est adapté un tube, qui porte en f un petit treuil sur lequel s'enroule le fil de suspension. Une des extrémités de l'aiguille aimantée parcourt un arc divisé ; l'autre porte un index o que l'on vise, au moyen d'une lunette à réticule L, par une ouverture pratiquée dans la paroi de la boîte à laquelle elle est fixée. Au moyen de la vis de rappel r, on peut faire tourner un peu la boîte sur elle-même, de manière que le centre du réticule coïncide exactement avec l'index o, quand l'aiguille est en repos ; et, au moyen de vis calantes, on fait en sorte que la direction du fil de suspension passe par le centre de l'arc divisé. Pour faire ensuite osciller l'aiguille, on la déplace au moyen d'un levier à chevilles sur lequel on agit de dessous la boîte. L'emploi de la lunette permet de compter les oscillations, même quand elles sont très petites.

§ 3. — COMPARAISON DES FORCES MAGNÉTIQUES.

I. Lois des attractions et répulsions magnétiques.

1211. *Les intensités des attractions et des répulsions magnétiques varient en raison inverse des carrés des distances des centres d'action.* Cette loi, soupçonnée par Tobie Mayer et adoptée par Mitchell et par Lambert, a été démontrée par Coulomb par deux méthodes : celle des oscillations, et celle de la balance de torsion.

Méthode des oscillations. — Une aiguille *astatique* est soumise à l'action d'un aimant vertical, assez long pour qu'un seul de ses pôles puisse agir sur l'aiguille. On mesure la distance des deux pôles en présence, et l'on compte les oscillations faites pendant un temps donné. On répète la même opération pour une distance différente. Si m et m' représentent les forces magnétiques aux distances d et d', et n et n' les nombres d'oscillations accomplies pendant le même temps à ces deux distances, on aura (1209) $n^2 : n'^2 = m : m'$. Or, l'expérience montre que les quantités n, n', d, d' satisfont à la relation $n : n' = d' : d$; on aura donc $m : m' = d'^2 : d^2$.

On peut aussi opérer au moyen d'une aiguille aimantée soumise à l'influence de la terre : soit N le nombre d'oscillations qu'elle fait sous cette influence seule, n ce nombre quand elle oscille sous l'influence des actions du globe et du pôle d'un aimant placé dans le méridien magnétique, et n' ce nombre quand l'aimant est plus éloigné ; en appelant F, m, m' les forces magnétiques du globe, et de l'aimant aux deux distances considérées, on aura

$$N^2 : n^2 = F : m + F, \qquad N^2 : n'^2 = F : m' + F, \qquad \text{d'où, } \textit{componendo},$$

$$n^2 - N^2 : N^2 = m : F, \qquad \text{et} \qquad n'^2 - N^2 : N^2 = m' : F, \qquad \text{et enfin}$$

$$m : m' = n^2 - N^2 : n'^2 - N^2,$$

en divisant ces deux égalités terme à terme.

L'aiguille oscillante dont se servait Coulomb était suspendue par un fil de soie sans torsion ; elle pesait $3^{gr},75$, et faisait 15 oscillations par minute sous l'influence du globe. L'aimant vertical était formé d'un fil d'acier, et son pôle mathématique était à 30^{mm} de l'extrémité. On reconnaissait que ce pôle se trouvait dans le plan horizontal de l'aiguille quand on voyait celle-ci rester horizontale, et faire le maximum d'oscillations dans un temps donné.

1212. Balance magnétique. — Dans la seconde méthode, on emploie la *balance de torsion* ou *balance de Coulomb*, un des instruments les plus précis que les physiciens aient à leur disposition, et que l'inventeur avait déjà employée pour comparer les forces électriques, comme nous le verrons plus loin. La balance magnétique consiste en une cage en verre, cylindrique ou rectangulaire (*fig*. 884), fermée par une glace surmontée à son centre d'un tube de verre *t*. A la partie supérieure de ce tube est suspendu un fil métallique qui soutient une aiguille aimantée horizontale *ac*. Une bande, sur laquelle sont tracées des divisions qui correspondent à des angles de 1°, règne tout autour de la cage de verre, à la hauteur de l'aiguille. Ces divisions sont les degrés de la circonférence, quand la cage est cylindrique. Le fil de suspension s'enroule sur un petit treuil représenté à part en *o*. Ce treuil surmonte un bouchon métallique un peu conique qui s'enfonce à frottement doux dans un disque divisé en degrés. Ce disque peut tourner sur une virole *v* fixée au tube *t*. Il résulte de cette disposition, qu'on peut tordre le fil par le haut, soit en faisant tourner le cône *r*, soit en faisant tourner le disque gradué; un vernier tracé sur la virole *v* indique, dans le dernier cas, la quantité angulaire dont on fait tourner le fil par sa partie supérieure.

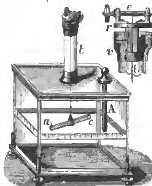


Fig. 884.

L'aiguille *ac* étant placée dans le méridien magnétique sans que le fil éprouve de torsion, on en approche, *dans le méridien magnétique*, le pôle d'un aimant A, que l'on fait passer par une ouverture pratiquée dans le couvercle de la cage de verre. Les pôles en présence étant supposés de même nom, l'aiguille est repoussée, et fait avec le méridien magnétique un angle que l'on évalue au moyen de la division qui entoure la cage de verre. Cet angle est aussi l'angle de torsion, et peut servir de mesure à la force de torsion. Cette force, jointe à l'action magnétique de la terre, fait équilibre à la répulsion de l'aimant, à la distance où son pôle se trouve du pôle de l'aiguille *ac*. Si donc nous représentons par m la répulsion magnétique, par α la force de torsion, et par θ celle qu'il faudrait pour amener l'aiguille dans la position qu'elle occupe, si elle était soumise à l'influence de la terre seule, on aura $m = \alpha + \theta$, pour la valeur de la force magnétique exercée à la distance représentée par l'angle d'écart.

Si maintenant on tourne la virole supérieure d'une quantité β, de manière à rapprocher le pôle *c*, de l'aimant A, la répulsion sera exercée à une distance moindre, et si α_1 est l'angle que fait l'aiguille avec le méridien magnétique, $\beta + \alpha_1$ sera l'angle de torsion. En appelant θ_1 la torsion qui représente l'action

terrestre dans la même position de l'aiguille, et m_1 l'action répulsive qu'exercent l'un sur l'autre les deux pôles en présence, on aura $m_1 = \beta + \alpha_1 + \theta_1$. L'expérience montre que les valeurs de m et m_1 satisfont très sensiblement à la relation

$$m : m_1 = \alpha^2{}_1 : \alpha^2.$$

Pour vérifier la loi du carré des distances dans le cas des attractions, il faut tordre le fil par le haut, de manière à écarter l'extrémité c de l'aiguille, du pôle de l'aimant A qui l'attire. L'angle de torsion est alors égal à la quantité dont on a fait tourner la virole supérieure, diminuée de l'angle que fait l'aiguille avec le méridien magnétique, et l'attraction m' est donnée par l'égalité $m' = \beta - \alpha - \theta_1$, en adoptant les mêmes notations que ci-dessus.

L'aiguille aimantée dont se servait Coulomb était un fil d'acier de 650mm de long et de 3mm,4 de diamétre; au-dessous duquel était suspendue une lame verticale en laiton plongeant dans l'eau et destinée à détruire les oscillations. L'aimant fixe était identique à l'aiguille mobile, et leur point de croisement se trouvait à 27mm de l'extrémité. L'action du globe avait été évaluée d'avance, Coulomb la supposait proportionnelle à l'angle trés petit formé par l'aiguille avec le méridien magnétique, les angles se confondant avec les sinus, pour les petits écarts.

1213. Causes d'erreur. — Dans cette manière d'opérer, il y a différentes causes d'erreur : d'abord, les points de l'aimant fixe qui agissent sur l'aiguille mobile ne sont pas seulement ceux qui se trouvent dans la section faite par le plan horizontal qui la contient; des points placés au-dessous et au-dessus de cette section agissent aussi, et d'une manière plus sensible relativement, quand la distance est plus grande, parce que l'obliquité est alors moins prononcée. L'effet observé est donc très complexe, et la loi n'est vérifiée qu'approximativement pour deux éléments magnétiques. — D'un autre côté, les distances sont comptées sur des arcs au lieu de l'être sur leur corde; et l'action s'exerce obliquement à la direction de l'aiguille. Il est facile de voir que les deux dernières causes d'erreur sont très petites pour les faibles écarts, et qu'elles tendent à se compenser. En effet, on prend les distances trop grandes en les comptant sur l'arc, et les forces aussi trop grandes en les considérant tout entières, au lieu de prendre leur composante normale à l'aiguille. On peut, du reste, tenir compte de ces deux causes d'erreur par la méthode suivante :



Fig. 885.

Soit oa (*fig.* 885) l'aiguille dans le méridien magnétique, oa' sa position quand elle est soumise à l'influence de l'aimant b. La distance à laquelle la répulsion s'exerce est représentée par la corde aa' ou par $2ac$. Or, en posant $aoa' = \alpha$, et $oa = l$, on a $ac = l \sin \frac{1}{2}\alpha$. La distance est donc $d = 2l \sin \frac{1}{2}\alpha$. La force répulsive $a'r$ se décompose en deux autres : l'une sur le prolongement

de oa', l'autre perpendiculaire. Cette dernière composante, dont la valeur est $r \cos \frac{1}{2} \alpha$, fait équilibre à la force de torsion et à l'action directrice du globe. Si t est la force de torsion correspondant à 1°, et F la composante horizontale de la force magnétique du globe, on aura donc

$$r \cos \tfrac{1}{2} \alpha = \alpha t + F \sin \alpha, \quad \text{d'où} \quad r = \frac{\alpha t + F \sin \alpha}{\cos \frac{1}{2} \alpha}.$$

Pour obtenir un écart moindre, α', on tourne la virole supérieure de la balance magnétique, d'une quantité β; la distance aa' est alors remplacée par la distance $d' = 2l \sin \frac{1}{2} \alpha'$, et la répulsion magnétique devient

$$r' = \frac{(\alpha' + \beta) t + F \sin \alpha'}{\cos \frac{1}{2} \alpha'}.$$

On compare ensuite les valeurs de r et r' aux carrés des valeurs de d et d'.

On peut faire autrement : si la loi du carré des distances est vraie, et si l'on désigne par φ la force répulsive à l'unité de distance, par α l'angle d'écart, et par b l'angle total de torsion, on aura

$$\frac{\varphi}{d^2}, \text{ ou } \frac{\varphi}{4l^2 \sin^2 \frac{1}{2} \alpha} = \frac{bt + F \sin \alpha}{\cos \frac{1}{2} \alpha}, \quad \text{d'où } \frac{\varphi}{4l^2} = (bt + F \sin \alpha) \sin \tfrac{1}{2} \alpha \tang \tfrac{1}{2} \alpha.$$

Le premier membre étant constant, il devra en être de même du second, quel que soit l'angle d'écart, si la loi des carrés est vraie.

II. Comparaison de la force des aimants. Distribution du magnétisme.

1214. Comparaison de la force des aimants. — Pendant longtemps, on a comparé la force des aimants, en cherchant le poids maximum qu'ils pouvaient porter. Ce moyen ne donnait qu'une approximation grossière, parce que ce poids dépend de plusieurs circonstances; par exemple de la manière dont la charge est appliquée, et de la lenteur avec laquelle on l'augmente, comme nous le verrons plus loin (1227). Aujourd'hui, on emploie la méthode des oscillations, ou bien on se sert de la balance de torsion. Pour la méthode des oscillations, on procède comme nous l'avons indiqué ci-dessus (1211); seulement, au lieu d'un même aimant placé à différentes distances, on fait agir successivement les aimants que l'on veut comparer, en les plaçant toujours à la même distance de l'aiguille d'épreuve. Celle-ci doit être assez éloignée pour que son état magnétique ne soit pas modifié par les aimants. La balance de torsion s'emploie comme nous l'avons dit plus haut (1212); seulement, après

avoir introduit successivement en A (*fig.* 884) chacun des aimants que l'on veut comparer, on a soin de donner toujours le même écart à l'aiguille mobile, par rapport au méridien magnétique ; ce qu'on obtient en tordant plus ou moins le fil de suspension par le haut.

Moment magnétique d'un aimant. — On peut encore placer les aimants dans un étrier fixé au fil de suspension de la balance de torsion, de manière qu'ils restent dans le méridien magnétique sans qu'il y ait de torsion. On cherche ensuite de combien de degrés il faut faire tourner le micromètre supérieur pour obtenir un écart constant pour tous les aimants que l'on compare : les forces de torsion ainsi obtenues pour les divers aimants, représentent ce que Coulomb a désigné sous le nom de *moment magnétique* de ces aimants. Le moment magnétique dépend à la fois de l'intensité magnétique et de la distance des pôles à l'axe de suspension. Nous verrons plus loin des expériences, dans lesquelles les trois méthodes que nous venons d'indiquer sont utilement employées.



Fig. 886.

1215. Distribution du magnétisme dans les aimants suivant la longueur. — C'est encore à Coulomb que nous devons les recherches les plus exactes sur ce sujet ; il a procédé au moyen de sa balance magnétique, ou en se servant de la méthode des oscillations. Avant lui, on se contentait de chercher le poids maximum que l'aimant pouvait soutenir à ses différents points.

Méthode par la balance de torsion. — On commence par introduire dans la balance, une règle verticale en bois LL' (*fig.* 886), de manière qu'elle touche l'aiguille mobile *ab*, placée dans le méridien magnétique, sans que le fil de suspension soit tordu. La règle porte une rainure pratiquée du côté opposé, dans laquelle on fait glisser verticalement une aiguille cylindrique aimantée *a'b'*, dont le pôle inférieur est de nom contraire au pôle *a*. L'aiguille mobile est alors repoussée ; mais on la ramène dans le méridien magnétique en tordant le fil par le haut, alors l'extrémité *a* touche de nouveau la règle, et l'angle de torsion mesure la force répulsive exercée. On fait ensuite descendre l'aimant *a'b'*, de manière à présenter un autre point à l'aiguille mobile, et l'on observe un autre angle de torsion. Comme l'aimant est très près de l'aiguille, il n'y a que les points très voisins de la section droite faite par le plan horizontal qui la contient, qui agissent efficacement ; ceux qui se trouvent à quelques millimètres au-dessus ou au-dessous agissant très obliquement.

Méthode par les oscillations. — Pour appliquer cette méthode, Coulomb faisait osciller un petit aimant *a* (*fig.* 887) suspendu à un fil de cocon, en face des différentes sections d'un fil d'acier aimanté *oo'*, placé verticalement dans le méridien magnétique. L'aimant *a*, dont on voit la coupe en *b*, avait reçu le maximum d'aimantation, afin que son état ne pût pas être influencé par le magnétisme différent des divers points de l'aiguille *oo'*, dont il était toujours

également éloigné. En désignant par m et m' les intensités magnétiques en deux points différents, par N, n, n' les nombres d'oscillations de l'aimant a sous l'influence de la terre seule, et sous cette influence réunie à celle d'un des deux points considérés, on aura (1211)

$$m : m' = n^2 - N^2 : n'^2 - N^2.$$

1216. Distribution dans un aimant linéaire. — Coulomb a représenté les intensités aux différents points d'une aiguille linéaire oo' par des perpendiculaires, dont il a réuni les extrémités par une courbe; seulement il a doublé les résultats obtenus aux deux extrémités, parce que l'aimant oscillant a est sollicité par des points placés au-dessus et au-dessous de la section de l'aiguille oo' située à la même hauteur, et qu'il manque la moitié de ces points quand on arrive à l'extrémité. Cette manière de procéder est justifiée par l'observation des intensités près d'un point conséquent : la courbe est symétrique de part et d'autre de la perpendiculaire qui correspond à ce point, et elle présente la même forme générale que celle que l'on construit en doublant l'intensité à l'extrémité libre d'une aiguille aimantée.

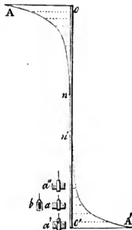


Fig. 887.

La *fig*. 887 montre la forme de la courbe quand l'aimant a partout la même section et que sa longueur est très grande par rapport à cette section. On voit qu'il y a un espace neutre nn', à partir duquel la force magnétique va en augmentant de plus en plus rapidement. La courbe reste la même pour des aimants de même section mais de longueur différente, pourvu que cette longueur surpasse 25 centimètres; l'espace neutre nn' varie seul.

Les pôles de l'aimant oo' correspondent au centre de gravité des surfaces Aon, A'$o'n'$, puisque ce sont les points d'application des résultantes de forces proportionnelles aux ordonnées des courbes An, A'n'. Coulomb en a déterminé la position par le calcul, et il a trouvé que les distances de ces points aux extrémités des aiguilles cylindriques sont entre elles à peu près comme leurs diamètres. Dans les aiguilles qu'employait Coulomb, la distance était de 40^{mm}. A égal diamètre, cette distance reste la même, quelle que soit la longueur, quand elle dépasse 25^{cm}; et, les courbes affectant la même forme, le moment magnétique est proportionnel à la distance des pôles entre eux.

Quand l'aimant est très court, les pôles sont placés à une distance des extrémités un peu plus grande que $\frac{1}{6}$ de la longueur, et l'excès est d'autant plus petit que l'aimant est plus court; c'est qu'alors la courbe se rapproche beau-

coup d'une ligne droite : le pôle est donc au centre de gravité d'un triangle, c'est-à-dire au tiers de sa hauteur à partir de la base.

M. Biot[1], en s'appuyant sur l'analogie qui existe entre les fils aimantés et les piles électriques, dont nous parlerons en traitant du condensateur électrique, a trouvé pour la courbe, l'équation logarithmique

$$y = \mathrm{A}\,(n^x - n^{2l-x}),$$

dans laquelle les abcisses sont comptées suivant la longueur, à partir de l'extrémité nord. A et n sont des constantes, et $2l$ la longueur de l'aiguille. Quand cette longueur est trés grande, la valeur de n est une fraction voisine de $\frac{1}{2}$; on peut donc négliger n^{2l-x} devant n^x, et l'équation se réduit à $y = \mathrm{A}n^x$. La distance des pôles aux extrémités est donnée par la formule

$$x = -\left(2ln^l + \frac{(1-n^{2l})}{\log n}\right)\frac{1}{(1-n^l)^2},$$

dans laquelle les logarithmes sont hyperboliques. Si la longueur est très grande, n est une fraction, et en négligeant ses puissances, il vient $\mathrm{X} = -\frac{l}{\log n}$. Les résultats calculés au moyen de ces formules s'accordent d'une maniére trés satisfaisante avec ceux que donne l'observation.

Expériences avec des fils très fins. — Pour se rapprocher autant que possible de la condition d'une seule file d'éléments magnétiques, M. Becquerel[2] a préparé des fils d'acier ayant moins de $\frac{1}{20}$ de millimétre de diamètre, par le procédé de Wollaston, en les tirant à la filière aprés les avoir enveloppés d'une couche d'argent. Il enlevait ensuite l'argent en le dissolvant dans du mercure bien sec. Un fil d'acier, entouré de sa gaîne d'argent, afin qu'il pût rester rectiligne, était aimanté, puis suspendu dans la balance de Coulomb à un fil de platine trés fin, le fil d'acier ne possédant qu'un très faible degré de magnétisme; et l'on opérait comme il a été dit plus haut (1215). La distribution du magnétisme s'est trouvée d'accord avec la loi établie par M. Biot. Le fil ayant $\frac{1}{75}$ de millimétre de diamétre, et 128^{mm} de longueur; les pôles étaient encore à $8^{mm},5$ des extrémités, malgré la petitesse du diamètre.

Courbes magnétiques. — Les courbes que dessinent les parcelles de limaille dans le spectre magnétique (1193), peuvent servir à donner une idée de la manière dont est distribué le magnétisme dans les aimants. Lambert était parvenu à trouver une équation de ces courbes. M. Roget a donné le moyen de les tracer soit par points, soit d'une manière continue; mais les résultats ainsi obtenus, quoique très intéressants, ne peuvent être comparés, pour la précision, avec ceux que donnent les méthodes de Coulomb.

[1] *Traité élémentaire de physique expérimentale et mathématique*, t. III, p. 75.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXII, p. 113.

1217. Distribution dans les aimants non rectilignes. — Dans ce qui précède, il n'est question que d'aimants prismatiques, dont l'aimantation est régulière, et dont la ligne neutre est au milieu. Quand l'aimant a une forme différente, ou quand il est aimanté irrégulièrement, le calcul ne peut plus faire connaître la position des pôles ; et on la cherche alors par l'expérience. On a reconnu ainsi que, dans les aiguilles en forme de losange allongé, les pôles se rapprochent du centre, et d'autant plus que le losange est moins allongé. — Dans des anneaux bien homogènes, les pôles peuvent être aux extrémités d'un même diamètre, ou de deux diamètres différents. Dans des lames larges et épaisses, l'aimantation est presque toujours irrégulière, et il y a souvent des points conséquents.

Les aimants rectilignes à section très petite peuvent aussi être aimantés irrégulièrement, les deux pôles étant de force inégale ; alors la ligne neutre se trouve plus rapprochée du plus fort, de manière qu'il y ait toujours les mêmes quantités des fluides libres dans les deux moitiés.

Il résulte des expériences de M. Kupffer, que l'influence de la terre suffit pour déplacer la ligne neutre : dans notre hémisphère, si l'aimant est placé verticalement le pôle nord en bas, ce pôle devient plus puissant que l'autre, et la ligne neutre s'abaisse. Si l'on met le pôle sud en bas, la ligne neutre revient au milieu, et les pôles reprennent des forces égales.

De Haldat a aimanté des plaques d'acier de 2 à 3 décimètres carrés de surface et de 1 à 3mm d'épaisseur, en promenant sur la surface l'extrémité un peu arrondie d'un fort aimant[1]. La limaille dessine ensuite sur ces plaques le chemin qu'a suivi l'aimant, en formant ce qu'il nomme des *figures magnétiques*. Ces figures présentent la forme de rubans, dont la largeur dépend de celle de l'aimant; la limaille s'accumule sur les bords, de manière à en marquer nettement les limites, et abandonne l'espace intermédiaire; on observe un effet semblable autour des pôles des aimants, quand on forme le spectre magnétique, comme on peut le voir, *fig.* 368. Ces figures magnétiques peuvent aussi s'obtenir en interposant entre l'aimant et la plaque d'acier des lames de substances non magnétiques, comme du bois, du carton...; seulement il faut passer plusieurs fois sur les mêmes lignes, parce que l'aimant agit à une certaine distance. On peut aussi combiner ces figures magnétiques avec les figures acoustiques de Chladni, en faisant vibrer la plaque avec un archet, ce qui ne détruit pas son aimantation. Mais si l'on vient à la frapper à coups précipités avec un petit maillet en bois, elle rentre à l'état neutre, les secousses réitérées faisant céder la force coërcitive.

1218. Distribution du magnétisme transversalement dans les aimants. — Quand, partant de l'axe de figure d'un aimant prismatique, on s'avance vers l'extérieur, on trouve que l'aimantation est de plus en plus prononcée. D'où l'on conclut que la force magnétique des aimants réside princi-

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XLII, p. 33.

palement près de leur surface. Coulomb a fait à ce sujet les expériences suivantes : il prit 16 lames égales d'acier, taillées dans une même feuille de tôle mince, et ayant 21mm de largeur et 162mm de longueur. Il les aimanta à saturation et les superposa, de manière à en former des faisceaux, composés successivement de 2, 3, 4..., 16 lames. Il essaya ensuite chaque faisceau dans la balance magnétique, en cherchant l'angle de torsion qui pouvait l'écarter de 30° du méridien magnétique, et il trouva les résultats suivants :

Nombre des lames...	1	2	4	6	8	12	16
Angles de torsion...	82°	125°	150°	172°	182°	205°	229°

On voit que la force directrice est loin d'être proportionnelle au nombre des lames, ce qui tient à ce qu'elles réagissent les unes sur les autres, et modifient mutuellement leur état magnétique. En effet, ayant séparé les lames, Coulomb reconnut que leurs forces n'étaient plus égales et allaient en diminuant de l'extérieur à l'intérieur. Les angles de torsion nécessaires pour les éloigner de 30° du méridien magnétique étaient, pour les 8 qui se trouvaient d'un côté, en commençant par l'extérieur :

Rang des lames.....	1re	2e	3e	4e	5e	6e	7e	8e
Angles de torsion....	48°	36°	35°	33°	34°	38°	35°	31°

Il faut remarquer que ces résultats ne représentent pas exactement les forces des différentes lames quand elles sont assemblées; car, une fois séparées et soustraites à leur influence mutuelle, leur état a dû changer. Dans tous les cas, il y a un affaiblissement notable des lames quand elles sont réunies; car, le moment magnétique d'une seule, prise isolément, ayant été de 82°, celui des 16 lames réunies n'était que de 228°,8, ce qui fait en moyenne, pour chaque lame, 14°,3 seulement. Coulomb a aussi trouvé quelquefois les lames du milieu à l'état neutre, ou même aimantées en sens inverse des autres. On voit donc qu'un barreau ne peut être considéré comme formé de fils très fins aimantés également, ce qui explique pourquoi les pôles se rapprochent des extrémités à mesure que la section devient plus petite.

Nobili a étudié la même question [1]. Il forma un paquet de 50 aiguilles, qu'il aimanta ainsi réunies. Les ayant ensuite séparées, il les trouva fortement aimantées toutes dans le même sens. Il les réunit de nouveau, en les serrant les unes contre les autres au moyen d'un cordon, les sépara au bout d'une demi-heure, et reconnut que certaines d'entre elles étaient à l'état neutre. Dans une autre expérience, dans laquelle les aiguilles restèrent réunies pendant deux heures, plusieurs d'entre elles eurent leurs pôles renversés. Nobili a

[1] *Bibliothèque universelle de Genève* (Sciences et arts), t. LVI, p. 82.

conclu de là que les aiguilles réagissent les unes sur les autres : les plus fortes détruisant peu à peu l'aimantation des plus faibles.

Dans ce qui précède, il est question de faisceaux d'aiguilles ou de lames aimantées, et non d'aimants d'une seule pièce. Mais Coulomb ayant reconnu qu'un faisceau de lames pressées les unes contre les autres prend la même force magnétique qu'un barreau unique de mêmes dimensions extérieures, on est porté à penser que, dans les aimants d'une seule pièce, la force magnétique va aussi en diminuant de l'extérieur à l'intérieur. Voici des expériences qui viennent à l'appui de cette manière de voir. Nobili trempa et aimanta deux cylindres du même acier et de mêmes dimensions extérieures, dont l'un était massif et l'autre foré dans toute sa longueur, et il trouva que ce dernier déviait une aiguille d'épreuve de 19°, tandis que l'autre ne la déviait que de 9°,5 quoiqu'il eût un poids, presque double du premier. Peut-être le cylindre creux était-il plus fortement trempé que l'autre et doué d'une plus grande force coërcitive.

De Haldat, ayant fortement aimanté un tube de fer, au moyen d'un courant électrique, par un procédé que nous indiquerons plus tard, reconnut que la force magnétique était la même quand ce tube était vide, et quand il contenait un cylindre massif prenant bien juste, ou de la limaille de fer fortement tassée. Le même physicien a tenté, mais en vain, de faire passer l'aimantation, du milieu d'un faisceau, où les fils ou lames étaient aimantés, dans les parties extérieures qui étaient à l'état neutre. Enfin, M. Barlow a reconnu que l'action magnétique exercée sur une aiguille aimantée, par des globes de fer, creux ou massifs, est la même, pourvu que l'épaisseur soit au moins $0^{mm},1$.

§ 4. — DE L'AIMANTATION ET DE LA FORCE DES AIMANTS.

I. Procédés d'aimantation.

1219. Des différents moyens d'aimantation. — Aimanter, c'est décomposer le fluide neutre, dans les éléments magnétiques des substances douées de force coërcitive. On aimante au moyen d'aimants, au moyen du magnétisme du globe, et par l'électricité. Nous ne considérerons ici que l'aimantation par les aimants et par la terre. L'action de l'électricité, qui fournit le moyen le plus énergique, ne sera étudiée que plus tard.

On a cru longtemps, d'après M. Morichini et Mme Sommerville, que la lumière solaire avait la propriété d'aimanter de petites aiguilles d'acier. Mais il résulte des recherches de M. Pouillet et de MM. Riess et Moser, que cette opinion est erronée. Les signes de magnétisme observés par les premiers

observateurs peuvent être attribués à l'action magnétique du globe, facilitée par la chaleur solaire, qui fait céder la force coërcitive.

Du point de saturation. — Les fluides séparés dans un aimant tendent à se recombiner, ils ne restent séparés qu'autant que la force coërcitive peut s'opposer à leur réunion. Or, cette force est limitée; il y a donc pour chaque corps un *maximum* d'aimantation, qui dépend évidemment de sa nature, de son volume, de sa forme et de la force coërcitive dont il est doué. Quand on a obtenu ce maximum, on dit que le corps est aimanté à *saturation*.

1220. Méthodes de la simple touche. — La première idée de fabriquer des aimants artificiels paraît due à Savery. La méthode qu'on a d'abord employée pour aimanter, consiste à mettre l'extrémité du barreau d'acier trempé à aimanter, en contact avec l'un des pôles d'un aimant. Le pôle de ce dernier agit sur le fluide neutre en faisant céder la force coërcitive, attire de son côté le fluide de nom contraire, et repousse à l'opposé le fluide de même nom. L'effet se fait sentir jusqu'à l'extrémité la plus éloignée, malgré la distance, parce que les éléments magnétiques agissent les uns sur les autres comme les morceaux de fer dans la chaîne magnétique (1197). Seulement, l'effet est de plus en plus faible à mesure qu'on s'éloigne du point touché, la ligne neutre est plus rapprochée de ce point, et le pôle opposé est diffus et peu marqué. L'action peut même ne pas se faire sentir jusqu'à l'extrémité, quand le barreau est long et fortement trempé. Il peut aussi se former un point conséquent à une certaine distance, au-delà duquel il n'y a plus de traces d'aimantation, ou bien après lequel on trouve un pôle de nom contraire à celui de l'aimant, puis quelquefois un troisième de même nom. Ces points conséquents sont de plus en plus faibles; on peut attribuer leur formation à l'influence du fluide décomposé dans le pôle qui les précède immédiatement.

Du reste, la décomposition ne se fait pas instantanément, le Dr Robison a reconnu qu'elle a lieu de proche en proche, et d'autant plus lentement que l'acier est plus fortement trempé [1]. Ainsi, quand le barreau touche le pôle positif de l'aimant, il se forme d'abord un pôle négatif au point en contact, un peu plus loin un pôle positif, puis un second pôle négatif très faible. Ces pôles marchent lentement vers l'extrémité opposée à l'aimant; et si le barreau n'est pas trop long, au bout d'un certain temps le premier pôle positif en atteint l'extrémité, et l'aimant est constitué avec deux pôles seulement. Si le barreau est très long, le déplacement finit par s'arrêter, et il reste des points conséquents. En faisant vibrer le barreau, on accélère l'établissement définitif de l'équilibre magnétique.

Par la méthode qui précède, on ne peut aimanter que de très petits barreaux, on obtient rarement la saturation, et l'aimantation est irrégulière, à moins que le barreau ne soit très court et l'aimant très puissant. On arrive

[1] *Traité d'électricité*, par M. A. De la Rive, t. I, p. 194.

à une aimantation régulière, en plaçant la pièce à aimanter entre les pôles contraires de deux aimants de même force.

Simple touche avec friction. — On peut aimanter à saturation de petits barreaux, en les faisant glisser plusieurs fois de suite sur le pôle d'un aimant, en ayant soin de toujours marcher dans le même sens, de manière que chaque élément magnétique soit soumis à son tour à l'action directe du pôle de l'aimant. Pour nous rendre compte de ce qui se passe, considérons une file d'éléments magnétiques AB (*fig.* 888), au-dessus de laquelle on fait glisser le pôle positif de l'aimant C, dans le sens de la flèche. Quand l'aimant arrivera en *n*, il se fera dans les différents éléments, une décomposition indiquée par les signes + et —. Celle qui existe dans la partie *n*A, vers laquelle marche l'aimant C, sera intervertie en chaque point, dès que l'aimant l'aura dépassée; de manière que tous les éléments seront disposés comme ceux de la partie *n*B, quand l'aimant sera arrivé à l'extrémité A. Quand on fera passer une seconde fois l'aimant en allant toujours de B en A, les mêmes effets se produiront. On ne comprend pas bien pourquoi l'état d'aimantation est augmenté; à moins qu'on n'admette que dans la partie *n*A, l'état magnétique établi lors du premier passage n'est pas entièrement détruit et interverti quand l'aimant passe de nouveau. On voit que l'extrémité, la dernière touchée, prend un pôle contraire à celui de l'aimant.

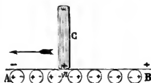


Fig. 888.

1221. Méthodes de la double touche. — Jusqu'au milieu du XVIIIe siècle, on ne connut pas d'autres moyens d'aimantation que ceux que nous venons d'indiquer. Vers 1745, Réaumur et Buffon reçurent d'Oxford de petits barreaux aimantés, venant du médecin anglais Knight, qui avaient une puissance extraordinaire, eu égard à leurs dimensions. Quelque temps auparavant, un fabricant d'aimants, Lemaire, avait imaginé une méthode nouvelle qui lui donnait des résultats remarquables. L'arrivée des aimants de Knight engagea Duhamel à essayer cette méthode, et il parvint, en aimantant des fragments de lame de sabre placés les uns sur les autres, à communiquer au plus petit, qui était en dessus, un degré d'aimantation comparable à celui des aimants de Knight. Ce dernier annonçait qu'il n'employait pas de pierre d'aimant, mais il tenait son procédé secret. Mitchell et Canton, en Angleterre, Duhamel et Antheaume, à Paris, tentèrent d'arriver aux mêmes résultats, et c'est à leurs expériences et à celles d'Æpinus que nous devons les procédés, perfectionnés par Coulomb, dont on fait usage aujourd'hui pour aimanter les plus gros barreaux. Tous ces procédés, dans lesquels on emploie plusieurs aimants, portent le nom de *méthodes du double contact* ou de la *double touche*.

Méthode de Knight. — Voici d'abord comment opérait Knight : il plaçait bout à bout par les pôles contraires, deux gros barreaux aimantés, et posait

sur eux, dans le sens de leur longueur, le barreau à aimanter, de manière que son milieu fût sur le point de jonction. Faisant ensuite tenir ce barreau par un aide, il séparait les aimants et les faisait glisser jusqu'aux extrémités. On voit que, les deux aimants concourant à la décomposition qui se fait dans les éléments magnétiques, l'aimantation devait être bien plus complète que lors qu'on n'en emploie qu'un seul. Knight, qui avait aussi découvert l'effet de la trempe sur la force coërcitive, opérait sur des barreaux d'acier fortement trempés, et obtint ainsi des aimants beaucoup plus puissants que tout ce que l'on connaissait alors.

Méthode de Mitchell. — On dispose plusieurs barreaux d'acier les uns à la suite des autres, *ns* (*fig.* 889), et l'on place perpendiculairement au milieu, deux barreaux aimantés maintenus à une distance constante l'un de l'autre, et ayant leurs pôles opposés tournés du même côté. On les fait glisser ainsi, d'un bout à l'autre des barreaux *ns*, en les faisant aller et venir sans dépasser les extrémités *n* et *s*. On termine l'opération après que chaque moitié a reçu le même nombre de frictions, et quand les aimants arrivent au milieu; on les enlève alors dans la direction perpendiculaire à *ns*. On voit, dans cette manière d'opérer, à laquelle Mitchell a appliqué pour la première fois le nom de *double touche*, qu'un élément magnétique, placé en *n* entre les deux aimants, est soumis à la somme des actions exercées par les deux pôles, tandis que les éléments placés en dehors, ne subissent que la différence de ces actions. Tous les éléments magnétiques, se trouvant successivement entre les deux aimants, éprouveront tous les mêmes effets. Il est à remarquer que les barreaux placés au milieu acquièrent une bien plus grande force que ceux qui sont aux extrémités; c'est qu'ils subissent l'action de ces derniers, action qui retient à l'état de décomposition les fluides que les aimants mobiles tendent à recombiner dans les éléments magnétiques qui se trouvent en dehors de l'espace qu'ils recouvrent.

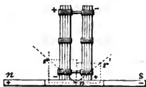


Fig. 889.

La distance à donner aux deux aimants n'est pas indifférente; elle dépend de la position de leur pôle mathématique. En effet, l'élément *n* est soumis à des actions obliques *nr*, *nr'* qui passent par ces pôles, et qui sont d'autant plus obliques que les pôles sont plus éloignés des extrémités. On diminue l'obliquité en écartant les deux aimants, mais en même temps les pôles s'éloignent du point *n*; il y a donc un milieu à garder pour que les composantes de *nr* et de *nr'*, parallèles à *ns*, soient maximum. Le calcul montre que la distance doit être telle que l'angle *rnr'* soit de 70° 31′ 44″. Æpinus avait trouvé que cet angle devait être droit; mais il admettait que les forces magnétiques variaient en raison inverse de la simple distance.

Méthode d'Æpinus. — Æpinus a apporté à la méthode de la double touche, un perfectionnement important, déjà réalisé par Duhamel, qui consiste à

incliner les deux aimants en sens contraire, de manière à rapprocher leur pôle mathématique, du barreau à aimanter. Voici comment se pratique aujourd'hui cette méthode, perfectionnée par Coulomb : on place le barreau à aimanter entre les deux pôles opposés de deux forts aimants *a*, *b* (*fig.* 890). Les aimants mobiles *c*, *d* sont posés sur le milieu, et inclinés à 15 à 20° ; on les sépare par un petit morceau de bois *o*, et l'on a soin que le pôle de chacun d'eux soit de même nom que celui de l'aimant fixe qui est du même côté. On fait ensuite glisser les aimants mobiles, d'une extrémité à l'autre du barreau, en les laissant toujours dans leur même position relative, et de manière que les deux moitiés du barreau subissent le même nombre de frictions. Les aimants fixes sont destinés à empêcher la recomposition des fluides, dans les éléments magnétiques qui sont en dehors des points touchés ; ils aident aussi par leur influence, à la décomposition du fluide neutre. Quand le barreau est fort et épais, il faut répéter l'opération sur ses quatre faces. Cette méthode est la plus efficace que l'on connaisse ; elle a cependant l'inconvénient de donner quelquefois des points conséquents, et une aimantation peu régulière. Coulomb a trouvé que la ligne neutre est plus rapprochée, de quelques millimètres, de l'extrémité qui a été touchée la dernière.

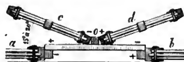


Fig. 890.

Méthode de la touche séparée, dite de Duhamel. — Les choses sont disposées comme pour appliquer le procédé d'Æpinus, seulement les aimants

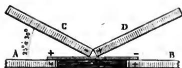


Fig. 891.

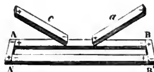


Fig. 892.

mobiles C et D (*fig.* 891) sont inclinés à 25 à 30°, et ne sont plus séparés par un morceau de bois. On les sépare ensuite l'un de l'autre, en les faisant glisser séparément sur chaque moitié du barreau. Quand ils sont arrivés aux extrémités, on les enlève pour les reporter au milieu et recommencer l'opération. — D'après Musschenbroeck, un ouvrier, nommé Jacob Dykgraaf, fabriquait des aimants par cette méthode. A la même époque, Duhamel et Antheaume, lors de leurs essais pour découvrir les procédés de Knight, étaient conduits à une méthode analogue : ils disposaient parallèlement l'un à l'autre deux barreaux d'acier AB, A'B' (*fig.* 892) réunis à leurs extrémités par deux barreaux de fer doux AA', BB', et opéraient des frictions au moyen de deux aimants inclinés, *a*, *c*, qu'ils séparaient, comme nous venons de l'expliquer.

Il est facile de voir que les magnétismes décomposés dans la barre frottée amenaient à l'état d'aimantation temporaire les barreaux de fer, et le magnétisme de ces derniers réagissait ensuite pour retenir à l'état de décomposition le fluide du barreau AB. — Coulomb a ensuite perfectionné cette méthode, en ajoutant les barreaux fixes, comme dans la méthode d'Æpinus.

La méthode de la touche séparée, moins puissante que celle d'Æpinus, donne une aimantation plus régulière; on l'emploie principalement pour les aiguilles des boussoles. L'aiguille à aimanter est appuyée sur les extrémités des aimants fixes, de manière à empiéter de 16 à 18^{mm} quand elle n'a que 8 à 10^{cm} de longueur, et de 35 à 40^{mm}, quand elle est plus longue. Si elle est mince, on la soutient au moyen d'une régle en bois.

1222. Remarques. — Les aimants obtenus par les divers procédés du double contact sont souvent *sursaturés*, c'est-à-dire qu'ils renferment plus de fluides séparés que la force coërcitive n'en peut maintenir quand elle est abandonnée à elle-même. Ce résultat provient de l'influence des aimants fixes, qui ajoutent leur action à celle de cette force; quand ces aimants sont ensuite enlevés, les fluides en excès se recombinent, et l'aimant retombe à l'état de saturation. Il est à remarquer que cet effet n'est pas instantané, il ne se produit que graduellement, et n'est complet qu'au bout d'un temps, quelquefois très long, que les variations de température, les secousses et l'action de la terre peuvent abréger.

Quand on veut augmenter la force d'un barreau non saturé, il faut avoir soin de ne pas employer des aimants plus faibles que ceux avec lesquels on l'a aimanté la première fois; on ne ferait que l'affaiblir. En effet, d'aprés ce que nous avons vu, à chaque passage des barreaux mobiles, il y a recomposition, au moins en partie, des fluides séparés dans les éléments magnétiques. Ensuite, il se fait une nouvelle décomposition qui rétablit, puis augmente l'état d'aimantation qui existait avant le passage. Or, si les aimants sont trop faibles, on conçoit qu'il pourra se faire que l'état définitif soit moindre que celui qui existait avant d'opérer avec ces aimants. On peut dire, généralement, que la force qui reste à l'aimant est celle que les barreaux employés lui auraient communiquée, s'ils l'avaient trouvé à l'état neutre.

L'ébranlement moléculaire produit par les frictions est trés utile, dans les différents procédés d'aimantation, pour faire céder la force coërcitive; et il faut appuyer fortement les aimants mobiles, quand on veut aimanter à saturation de gros barreaux. De Haldat plaça un morceau de fil de fer écroui entre les pôles opposés de deux aimants assez éloignés pour qu'ils ne pussent l'aimanter. Ayant alors frotté le fil de fer avec un corps non magnétique, la force coërcitive céda et le fer fut aimanté.

Du reste, la force coërcitive ne céde que peu à peu, et à chaque friction. Cette circonstance a été étudiée par M. Quételet[1]. Cet habile physicien a trouvé

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LIII, p. 248.

que, pour obtenir l'état de saturation, il faut que les frictions soient exercées sur toute la surface du barreau à aimanter. Il suffit généralemeut de 12 frictions pour arriver au maximum d'aimantation. L'intensité magnétique i, après un nombre x de frictions, en fonction de l'intensité maximum I que peut recevoir le barreau, est donnée par la formule

$$i = I\,(1 - 0{,}36^{\sqrt{x}}),$$

l'aimantation étant communiquée par la méthode de la touche séparée.

1223. Manière d'obtenir des points conséquents. — Pour obtenir des points conséquents, il faut employer des aiguilles très longues et fortement trempées, comme celles dont on se sert pour tricoter à la main. Veut-on obtenir un seul point conséquent, on exerce des frictions avec le pôle d'un aimant, en partant de chaque extrémité et s'arrêtant au milieu, où il se forme un pôle de nom contraire à celui de l'aimant. Pour obtenir plusieurs points conséquents, on appuie la baguette d'acier sur les pôles alternativement positifs et négatifs de plusieurs aimants perpendiculaires à sa direction, et on la frotte avec un corps non magnétique; chaque aimant produit alors un pôle de nom contraire à celui par lequel il agit.

1224. Aimantation par la terre. — Gilbert avait découvert, dès 1500, qu'en frappant par le bout, une barre de fer dirigée convenablement dans le méridien magnétique, on en faisait un aimant. Lorsque Knight eut annoncé qu'il aimantait sans aimants, on crut qu'il excluait les aimants artificiels comme les naturels, et l'on chercha à utiliser l'influence de la terre. Antheaume obtint de bons résultats en plaçant l'une à la suite de l'autre deux barres de fer parallèles à l'aiguille d'inclinaison, et faisant glisser longitudinalement le barreau à aimanter sur le point de jonction, en le faisant aller et venir lentement. Les barres de fer étant aimantées sous l'influence du globe, le barreau d'acier s'aimanta. — Marcell plaçait un barreau d'acier horizontalement, dans le méridien magnétique, entre deux grosses barres de fer, et le frottait avec une barre verticale du même métal. — Mitchell mettait les deux barres de fer aux extrémités et sur le prolongement du barreau d'acier, qu'il frottait ensuite avec une barre de fer verticale, en ayant soin d'aller toujours du nord au sud. Ayant aimanté ainsi quatre lames, il s'en servit pour en aimanter deux autres, qui furent plus fortes que les quatre premières, et dont il se servit ensuite pour augmenter leur force magnétique. En aimantant ainsi ces lames les unes par les autres, il parvint à en faire des aimants énergiques. Canton employait une méthode analogue.

Scoresby procédait par le moyen de chocs : il frappait d'abord sur le bout, une large barre de fer verticale, puis une barre d'acier de 80^{cm} de longueur, après l'avoir appuyée sur la barre de fer. Il frappait ensuite de petits barreaux d'acier suspendus à l'extrémité de la grande barre d'acier; tous ces barreaux furent aimantés. Ayant préparé de la même manière six barreaux aimantés, il

les aimanta successivement les uns par les autres, en suivant les méthodes ordinaires d'aimantation.

Le même observateur a constaté que le degré d'aimantation augmente en même temps que le nombre de coups frappés ; cependant il peut diminuer quand on les multiplie trop. Lorsque la barre est appuyée par le bout sur un corps non magnétique, l'effet est beaucoup moins prononcé.

On peut se procurer facilement de petits aimants, en tordant des brins de fil de fer, placés verticalement. L'écrouissage produit par la torsion, développe de la force coërcitive, comme l'a découvert Gay-Lussac, et l'état magnétique produit par l'influence du globe reste permanent. En liant ensemble plusieurs de ces petits aimants, et plaçant tous les pôles nord du même côté, on obtient un aimant assez fort.

II. De la force des aimants.

1225. La force des aimants dépend de leur volume, de leur forme et de la force coërcitive.

Influence du volume et de la forme. — Quant au volume, Coulomb a reconnu que : 1° les moments magnétiques des aimants de même substance et de forme semblable sont à peu près proportionnels aux cubes des dimensions homologues ; 2° dans les aiguilles cylindriques de même longueur, la quantité de magnétisme libre est sensiblement proportionnelle au diamètre ; 3° la durée d'une oscillation d'un barreau à section rectangulaire, dont la largeur est l, l'épaisseur e, et la longueur 2L, est donnée par la formule

$$t = me\sqrt{l + nL},$$

dans laquelle m et n sont des constantes qui dépendent de la nature et du degré de trempe de l'acier.

Quant à la forme, Coulomb a constaté que des lames minces d'acier en forme de losange allongé ont une plus grande *force directrice*, à poids égal, que des aiguilles rectangulaires de même épaisseur également trempées.

M. Kupffer a reconnu qu'en terminant en cône l'extrémité d'un barreau d'acier, le pôle qui se trouve à cette extrémité est plus faible que l'autre, et que la ligne neutre s'en éloigne. Le résultat est d'autant plus marqué que l'extrémité conique est plus aiguë et plus effilée.

Influence de la trempe. — Knight a reconnu le premier que l'acier trempé s'aimante plus fortement que celui qui ne l'est pas. Coulomb a fait sur ce sujet un travail remarquable, qui a été publié après sa mort par M. Biot [1], et dont voici les principaux résultats. Ayant aimanté à saturation un barreau

[1] *Traité de physique expérimentale et mathématique*, par M. Biot, t. III, p. 106.

d'acier, après l'avoir trempé à différents degrés, Coulomb le soumit à la méthode des oscillations, et obtint les nombres qui suivent :

Températures de la trempe......	875° c.	975	1075	1187
Temps de 10 oscillations.......	93^s	78	64	63

L'acier n'éprouve pas de modification sensible de structure quand on le trempe au-dessous de 870°; aussi les résultats magnétiques sont-ils les mêmes à tous les degrés de trempe inférieurs à cette limite. Trempé vers 1100°, l'acier peut recevoir une force magnétique double ; car la durée de 10 oscillations étant de 63^s au lieu de 93^s, les forces magnétiques sont en raison inverse des carrés de ces nombres, ou de 3969 et 8649.

Ayant trempé au cerise clair, vers 1100°, un barreau d'acier, et l'ayant aimanté après l'avoir recuit successivement à différents degrés, Coulomb a obtenu les nombres suivants :

Températures du recuit.........	15° c.	267	512	1122
Temps de 10 oscillations.......	63^s	64,5	70	93

On voit que la force magnétique est d'autant plus faible que le recuit est plus prononcé ; c'est que la force coërcitive diminue en même temps que la trempe.

Coulomb est arrivé à des résultats tout autres en opérant sur des lames ou des aiguilles minces et très allongées. Les ayant aimantées à différents degrés de trempe, et essayées dans la balance de torsion, ou par la méthode des oscillations, il trouva que, trempées à blanc, elles ne gardaient pas plus d'aimantation qu'après avoir été recuites entièrement. A mesure qu'il diminuait la trempe par le recuit, elles s'aimantaient plus fortement, jusqu'au recuit produit par la chaleur rouge sombre. En recuisant davantage, la force directrice qu'elles pouvaient recevoir allait en diminuant. M. Biot explique cette anomalie par la formation de deux points conséquents, dans les aiguilles très allongées et fortement trempées ; de sorte que chaque moitié possédant les deux pôles de nom contraire, la force directrice est très faible. Ces pôles se rapprochent du milieu à mesure qu'on diminue la trempe, et les points conséquents finissent par disparaître, comme l'expérience le montre en effet.

Pour les aiguilles des boussoles, on recuit ordinairement au bleu (I, 461), c'est-à-dire à 300° environ. A cet état, la force coërcitive, sans être maximum, est encore très grande, et l'acier est moins fragile qu'avec une trempe plus dure, et moins exposé à prendre des points conséquents.

Nobili a cherché à expliquer les effets de la trempe sur l'aimantation, par l'inégalité de densité des différentes parties du barreau trempé [1] : la couche

[1] *Bibliothèque universelle de Genève* (Sciences et arts), t. LVI, p. 82.

extérieure, plus dense que les parties internes, contient plus d'éléments, et reçoit par conséquent plus de magnétisme; et ce serait par la réaction des files extérieures d'éléments, sur les files plus rapprochées de l'axe, que l'état d'aimantation deviendrait permanent. La force coërcitive n'existerait donc pas, et les effets qu'on lui attribue seraient dus à cette réaction des différentes parties inégalement denses. Nobili explique par là pourquoi les aimants de petites dimensions sont relativement plus forts que les gros; la croûte plus dense qui les enveloppe étant relativement plus épaisse. Le fer écroui est aussi entouré d'une couche plus dense, et c'est pourquoi il peut s'aimanter. Enfin, l'expérience des aimants forés (1218) montre que le degré de trempe a plus d'influence que la masse. Cette manière de voir de Nobili, qu'il ne donne du reste qu'avec beaucoup de réserve, est très ingénieuse; mais elle ne peut faire renoncer à la force coërcitive, car elle n'explique pas pourquoi le fer mêlé d'un peu de soufre s'aimante quoique très homogène (1201), et pourquoi l'acier fortement trempé n'est pas attiré par les aimants. La plus grande force des petits aimants peut s'expliquer par un état de trempe plus prononcé que dans les grosses barres d'acier, qui ne peuvent être brusquement refroidies dans toute leur masse.

1226. Faisceaux magnétiques. — L'expérience prouve que les petits aimants sont proportionnellement plus puissants que les gros; on en voit qui portent jusqu'à 100 fois leur propre poids, tandis qu'on ne peut approcher d'un semblable résultat avec les gros barreaux. D'un autre côté, il est difficile de tremper de grosses barres d'acier sans les déformer, et de les aimanter ensuite à saturation. Ces considérations ont suggéré à Knight l'idée de réunir plusieurs barreaux. Coulomb a fait une étude attentive de ces sortes d'aimants composés, que l'on nomme *faisceaux magnétiques*, et c'est d'après les règles qu'il a posées qu'on les construit encore aujourd'hui.

Il est facile de prévoir d'abord que la puissance d'un faisceau ne peut être proportionnelle au nombre des lames qui le composent. En effet, nous avons vu plus haut (1218), que les barreaux réagissent les uns sur les autres, de manière à altérer mutuellement leur état d'aimantation. Pour diminuer cet effet, on leur donne des longueurs différentes, de manière que leurs extrémités soient disposées en gradins, ceux du milieu dépassant tous les autres. La *fig.* 893 représente, vu de face en *aa'*, et de profil au-dessus, un faisceau magnétique, d'après Coulomb. Ce faisceau est formé de trois couches de lames, dont celles du milieu dépassent les autres. Ces lames ne se touchent pas, et leurs extrémités sont enchâssées dans des masses de fer doux *a*, *a'*. Chacune de ces masses reçoit une aimantation par influence, qui donne naissance près de son extrémité à un pôle de même nom que ceux qui sont du même côté dans les lames. Ces masses de fer se nomment des *armatures*. Indépendamment de leur rôle pour donner un pôle près de l'extrémité, le fluide de nom contraire, développé près des extrémités des lames, réagit pour empêcher la recomposition des fluides dans ces dernières. Malgré cette influence,

on trouve parfois des faisceaux dont les lames intérieures ont perdu presque toute trace d'aimantation, et même dont les pôles ont été intervertis. Cependant les barreaux qui dépassent tous les autres, non seulement conservent leur magnétisme, mais encore restent plus puissants que dans tout autre arrangement; ce qui provient de ce que les pôles des autres barreaux agissent par influence sur l'extrémité qui dépasse, de manière à éloigner d'eux, c'est-à-dire à repousser vers l'extrémité, le pôle de même nom qui s'y trouve. Ce résultat explique pourquoi les aiguilles en losange sont plus fortes que celles qui sont rectangulaires, les différentes files de molécules parallèles à l'axe se comportant comme des aimants linéaires de longueurs différentes.

Scoresby a fait une étude particulière des faisceaux magnétiques[1]; il est parvenu à leur donner beaucoup plus de force qu'à un barreau unique de dimensions et de masse équivalentes, en ayant soin de séparer les barres les unes des autres. Il résulte de là qu'en construisant les aiguilles de boussoles



Fig. 893.

avec des lames minces superposées formant le même poids, on aura une plus grande force directrice. Du reste, l'accroissement de force des aiguilles composées, quand on augmente le nombre des lames, diminue graduellement à mesure que ce nombre est plus grand. Cette diminution, très rapide quand les lames se touchent, l'est d'autant moins qu'elles sont plus écartées. Enfin, plus les lames sont trempées dur, plus est sensible l'accroissement de force quand on en augmente le nombre. Ainsi, un faisceau composé de 196 lames, longues de $0^{m},4$, s'est trouvé six fois plus puissant quand l'acier avait été trempé au plus dur, que lorsqu'il n'avait reçu que la trempe ordinaire.

C'est au moyen des faisceaux magnétiques que Coulomb aimantait, soit par le procédé d'Æpinus, soit par celui de Duhamel (1221). C'est aussi au moyen de la réunion d'un grand nombre de lames, que l'on forme les aimants les plus puissants. Il en existe un, construit par Knight, à l'Institut royal de Londres, qui porte 50 kilogrammes; il est formé de 450 lames de 40 centim. de longueur. Il était autrefois beaucoup plus puissant. Son affaiblissement est attribué à l'échauffement qu'il éprouva dans un incendie. Malgré des tentatives répétées, on n'a pu parvenir à lui rendre sa vigueur primitive. — En aimantant les lames les unes par les autres et en prenant une foule de précautions, M. Keil a construit un aimant en fer à cheval ne pesant que $18^{kil},5$, et qui a porté 223^{kil}.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LXIX, p. 106.

1227. Expériences de M. Babinet. — M. Babinet a imaginé une disposition au moyen de laquelle on peut communiquer à une barre de fer doux une aimantation prodigieuse. On couche sur une table, une barre de fer très doux de $0^m,5$ de longueur, de 5 à 6^{mm} d'épaisseur, et de 15 à 20^{mm} de largeur. Une des extrémités dépasse de quelques centimètres le bord de la table. On appuie ensuite contre l'extrémité opposée de la barre et sur son prolongement, un barreau aimanté de *mêmes dimensions transversales*. On dispose enfin perpendiculairement, vers la même extrémité, 24 barreaux aimantés, 12 de chaque côté, qui touchent la barre par des pôles de même nom que celui du barreau placé à l'extrémité. Il se forme alors, à l'extrémité qui déborde la table, un pôle, aussi de même nom, capable de porter des poids énormes. Telle est la force d'attraction exercée sur une barre de fer appliquée à ce pôle, que si on la fait glisser, le fer est entamé, et des parcelles en sont arrachées. Une barre de fer de $0^m,5$, placée debout sur cette extrémité, se tient dans cette position, et peut elle-même soutenir une barre verticale de même grosseur, de 25 à 30^{cm} de longueur, qu'on y fait adhérer latéralement. En disposant des aimants tout autour de la barre de fer, au lieu d'en placer seulement de chaque côté, on produirait une aimantation encore plus énergique.

1228. Des armatures. — La force des aimants peut s'altérer à la longue, soit par les chocs auxquels ils peuvent être soumis, soit par les changements de température, soit enfin par l'action terrestre. Pour leur conserver toute leur force, Knight a imaginé de les conserver par paires dans une même boîte, en les plaçant parallèlement, à une certaine distance l'un de l'autre, de manière que les pôles opposés soient tournés du même côté, comme on le voit dans la *fig.* 894. Aux extrémités, sont adaptés de petits barreaux en fer doux *c*, *c'*, qui se nomment *contacts* ou *armatures*. Il se fait une décomposition de fluide neutre dans ces petits barreaux, de la manière qui est indiquée dans la figure par les signes + et —; et les fluides en présence, dans le fer et dans les aimants, empêchent en s'attirant, la recomposition dans ces derniers. *aa* est une règle de bois qui sépare les aimants B, B'.



Fig. 894.

On a tiré parti des armatures, pour disposer les paires de barreaux de manière à faire agir en même temps deux de leurs pôles, comme on le voit dans la *fig.* 895. Le contact de fer doux *ff* est maintenu contre les pôles supérieurs des deux faisceaux par des tiges *t*, *t* en cuivre. *pp* est une pièce en fer doux, nommée *portant*, qui adhère par attraction magnétique, et à laquelle on suspend la charge. Ainsi disposés, les aimants ont une *force portative* beaucoup plus grande que le double de celle de chaque barreau à l'un de ses pôles.

M. Bazin a eu l'idée de recourber un seul barreau aimanté, en forme de fer à cheval, de manière à faire agir les deux pôles sur un même *portant*. La *fig.* 896 représente un aimant ainsi disposé, formé de plusieurs lames superposées, dont les extrémités sont échelonnées comme cela doit toujours avoir lieu dans les faisceaux. On aimante ces barreaux recourbés, comme les barreaux droits, en plaçant sur le prolongement des deux branches, deux aimants fixes, et promenant les aimants mobiles sur les faces, en en suivant la courbure. Les aimants en fer à cheval portent beaucoup plus que le double de la charge

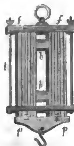


Fig. 895.


Fig 896.

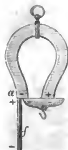


Fig. 897.

que porterait un de leurs pôles ; c'est qu'il se fait dans le portant, sous l'action des deux pôles réunis, une décomposition magnétique qui réagit ensuite pour augmenter la puissance de l'aimant. Pour mettre en évidence cette influence du portant, on le retire un peu, de manière à laisser à découvert une partie de l'extrémité d'une des branches de l'aimant, comme on le voit sur la *fig.* 897, et l'on suspend en *a* un morceau de fer aussi lourd que possible. Si l'on vient ensuite à enlever tout à fait le portant, le morceau de fer se détache aussitôt.

La forme et les dimensions du portant ont une grande influence sur la limite de charge, et c'est par tâtonnement qu'on arrive à lui donner les proportions les plus convenables. Il y a avantage à arrondir les extrémités, comme on le voit dans les *fig.* 896 et 897, et à donner une forme cylindrique à la surface de contact. — Pour mettre en évidence l'influence de la forme, on suspend au pôle d'un barreau aimanté, un cube de fer représentant sa limite de force ; on trouve ensuite que le même barreau ne peut porter que quelques grammes d'un fil de fer qu'on y suspend verticalement ; c'est que la quantité de fluide décomposé est très petite dans le fil de fer très étroit.

Aimants naturels armés. — Les aimants naturels sont généralement très faibles, mais on peut augmenter leur force dans une proportion étonnante, au moyen de pièces de fer, ou *armatures*, convenablement disposées. La *fig.* 898 représente un aimant naturel *armé*. Après avoir cherché la position des pôles

de la pierre d'aimant A, on y polit deux faces parallèles, sur lesquelles on applique, aussi exactement que possible, deux plaques de fer très doux, qui en recouvrent toute la surface. Ces plaques, fixées par des bandes de cuivre, et nommées *ailes* ou *jambes* de l'armature, sont terminées par des masses *a*, *a'*, ou *pieds*, qui s'avancent en dessous, de manière à s'appuyer exactement sur la face inférieure de l'aimant, auquel on a donné la forme d'un parallélipipède rectangle. *cc'* est le *portant* ou *contact*, auquel on suspend la charge.

Le rôle des armatures est facile à comprendre : le fluide neutre de l'aile est décomposé par l'action du pôle de la pierre d'aimant qui est de son côté. Le fluide attiré dans l'aile réagit sur celui de l'aimant, et y détermine une décomposition plus complète, de manière que la force de l'aimant est considérablement augmentée. De plus, le magnétisme reçoit une meilleure direction, et l'on peut enfin utiliser en même temps les deux pôles ; aussi l'aimant peut-il soutenir jusqu'à 200 fois la charge qu'il portait avant d'être armé.

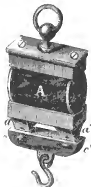
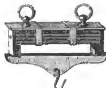


Fig. 898.

Pour arriver à de semblables résultats, il faut donner aux armatures une forme convenable. Il ne faut pas que les ailes soient trop minces, car alors le fluide attiré serait en trop faible quantité pour modifier l'aimantation de la pierre. Il ne faut pas non plus qu'elles soient trop épaisses, autrement l'action du fluide repoussé ne serait pas concentrée dans le pied. C'est par tâtonnement qu'on arrive à trouver l'épaisseur la plus favorable. On a reconnu qu'il y a avantage à amincir les ailes, à la partie supérieure. Les dimensions du pied s'obtiennent aussi par tâtonnement ; on les rétrécit par le bas, comme on le voit dans la *fig.* 898. Toutes les parties des armatures doivent être travaillées à la lime et non au marteau, afin de ne pas écrouir le fer doux.


Fig. 899.

Nollet a eu l'idée d'armer des aimants artificiels à la manière des aimants naturels ; il leur a trouvé alors une force beaucoup plus grande. La *fig.* 899 représente un aimant armé de cette manière. Nollet en cite un qui portait une charge six fois plus grande que celle qu'on pouvait suspendre à l'un de ses pôles avant qu'il fût armé.

Effet de la surcharge. — La décomposition magnétique qui se fait dans le portant, produit un phénomène assez singulier. Quand on charge un aimant peu à peu, on peut, au bout de plusieurs jours, arriver à lui faire porter plus du double de ce qu'il porte ordinairement. Mais si l'on vient à le surcharger au point que le portant se détache, l'aimant reprend subitement sa force pri-

mitive, et même, suivant quelques physiciens, il descend au-dessous de cette force. Si ce dernier fait est exact, il est inexplicable dans l'état actuel de la science. Du reste, la vigueur de l'aimant augmente peu à peu quand on l'abandonne à lui-même, garni de son portant chargé d'un poids.

1229. INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE SUR LA FORCE DES AIMANTS. — La force des aimants diminue sous l'influence de la chaleur, soit d'une manière permanente, soit seulement passagèrement. Gilbert a reconnu le premier qu'un aimant perd toute trace d'aimantation quand on l'échauffe jusqu'au rouge ; la chaleur fait donc céder la force coërcitive. Æpinus a tiré parti de cette propriété pour augmenter la force des aimants ; il les plaçait, après les avoir fait rougir, entre les pôles opposés de deux forts aimants, et les laissait refroidir dans cette position. La décomposition du fluide neutre, faite en l'absence de la force coërcitive, persiste quand cette force revient pendant le refroidissement. M. Hamann a eu l'idée de tremper les barreaux d'acier pendant qu'ils sont soumis à l'action des aimants destinés à les aimanter. Un barreau porté au rouge, puis trempé dans la position verticale, conserve aussi l'aimantation produite par l'influence du globe.

Coulomb a pu suivre le décroissement de la force magnétique d'un barreau à mesure que la température s'élevait. Il commença par le recuire, afin que la force coërcitive ne pût pas varier. L'ayant ensuite aimanté, puis chauffé à différentes températures, il le soumit à la méthode des oscillations, et arriva aux résultats suivants :

Températures.........	15° c.	50	100	264	425	637	850
Temps de 10 oscillations.	03^{s}	97,5	104	147	215	290	très grand.

M. Kupffer a étudié la loi de la diminution de la force d'un aimant à des températures élevées, en le faisant agir sur une aiguille aimantée, au-dessus de laquelle il le place, les pôles contraires en regard. Il observe ensuite le temps que met l'aiguille à faire un certain nombre d'oscillations sous l'influence de la terre et sous celle de l'aimant porté à différentes températures. Plus l'aimant est chaud, plus le temps des oscillations est grand. Mais la chaleur n'agit pas instantanément, elle demande un temps assez long pour produire tout l'affaiblissement dont elle est capable. Par exemple, ayant plongé un aimant plusieurs fois dans l'eau bouillante en l'y laissant séjourner chaque fois pendant 10 minutes, il a trouvé qu'à chaque immersion il y avait diminution de la force magnétique, et ce n'était qu'à partir de la sixième opération que l'état de l'aimant n'était plus changé.

M. Kupffer a aussi étudié l'effet de l'échauffement d'une seule moitié de l'aimant. Pour cela, il le plaçait parallèlement à côté de l'aiguille, les pôles contraires en regard. L'aiguille ne restait dans le méridien magnétique qu'autant que son milieu et celui de l'aimant se trouvaient en face l'un de l'autre. Si l'on venait ensuite à affaiblir, en l'échauffant, l'une des moitiés de

l'aimant, sa ligne neutre se rapprochait du pôle opposé, et l'aiguille était déviée en obéissant à l'attraction de ce dernier pôle, et d'autant plus que l'échauffement était plus grand. Un barreau de fer doux, mis à la place de l'aimant et aimanté sous l'influence du globe, a donné des résultats opposés : le pôle le plus échauffé était le plus puissant. Enfin, en observant par la méthode de Coulomb, la distribution du magnétisme suivant la longueur, dans une aiguille cylindrique (1215), M. Kupffer a reconnu que la chaleur diminue d'une manière plus prononcée la force magnétique, près des extrémités que vers le milieu.

M. Christie a constaté que la plus grande partie du changement d'intensité par la chaleur a lieu instantanément; ce qui s'explique par l'accumulation de la puissance magnétique prés de la surface (1218). Il a aussi reconnu que la force magnétique du fer doux augmente avec la température, au lieu de diminuer comme chez les aimants.

M. Dufour a étudié la diminution d'intensité jusqu'à 260°[1]. Il a suivi la même méthode que M. Kupffer; le barreau aimanté était plongé dans une cuve pleine d'huile, dont le couvercle était séparé de l'aiguille aimantée par un double écran rempli de ouate, de manière que la température de l'air autour de l'aiguille ne variait que de 8 à 10°. L'intensité de la terre, F, étant prise pour unité, et celle du barreau étant représentée par m, on a $m = F(n^2 - N^2) : N^2$, N et n étant le nombre d'oscillations de l'aiguille pendant le même temps, sous l'influence de la terre et sous celle de la terre et du barreau (1211). — M. Dufour a reconnu qu'on peut représenter la force de l'aimant, par la formule $m = a - bt - ct^2$, jusqu'à $t = 100°$; mais au-delà, la force diminue plus vite que ne l'indique cette formule. La diminution dépend aussi du barreau; elle est d'autant moins prononcée qu'il est plus fortement trempé.

M. Dufour a cherché à quelle température minimum le barreau perd toute son aimantation, et il a reconnu qu'aprés avoir été porté au rouge cerise vif, il présente encore des traces d'aimantation après le refroidissement; mais il peut se faire que cette faible aimantation se soit rétablie pendant le refroidissement, comme cela a lieu dans les expériences que nous allons passer en revue.

1230. Variations passagères produites par la chaleur. — Quand la température varie dans des limites restreintes, elle peut modifier la force des aimants d'une manière passagére; un échauffement la diminue, et elle reprend sensiblement son intensité quand la température revient à sa première valeur. La première observation à ce sujet est due à Canton. Saussure a reconnu et étudié ce phénoméne au moyen d'un instrument qu'il appelait *magnétomètre*; il consistait en un pendule suspendu trés délicatement, et dont la lentille était une balle de fer. Un arc divisé indiquait les déviations produites par l'aimant

[1] *Bibliothèque universelle de Genève* (archives des sciences, 1857), t. XXXIV, p. 295.

que l'on voulait étudier. La balance de torsion est bien préférable à cet instrument.

Manière de ramener les résultats à une même température. — Les changements alternatifs de force des aimants par la chaleur sont très importants à considérer dans les recherches sur la force magnétique du globe. M. Kupffer[1] s'est occupé spécialement de cette question; il a fait osciller des aiguilles aimantées sous l'influence de la terre, à différentes températures de l'air, et il a constaté que, de $-1°$ à $+37°,5$, la chaleur diminue le nombre des oscillations, de quantités proportionnelles aux accroissements de température ; c'est-à-dire que chaque degré de plus diminue d'une même quantité le nombre des oscillations, ou augmente d'une même quantité la durée d'une oscillation. Par exemple, la durée de 800 oscillations d'une aiguille cylindrique de 59^{mm} de longueur, a été augmentée de 0^s,4 par degré. Il résulte de là que, en appelant n_0 le nombre d'oscillations à 0° pendant un certain temps, n' ce nombre à $t°$ pendant le même temps, et c une constante qui dépend de l'aimant considéré, le nombre des oscillations, en passant de 0° à $t°$, sera diminué de cn_0t; de sorte qu'on aura $n = n_0(1 - ct)$. Cette formule donne le nombre d'oscillations à 0°, quand on connaît le nombre n d'oscillations à $t°$ pendant le même temps. Cela suppose que l'état magnétique de l'aiguille n'est pas modifié d'une manière permanente par la chaleur.

MM. Gauss, Weber et Goldsmith, ont fait des expériences sur le même sujet, en cherchant les déviations produites par l'aimant à différentes températures, sur une aiguille aimantée disposée d'une manière particulière, et que nous décrirons plus tard sous le nom de *magnétomètre* (1247). Si, par exemple, un aimant produit une déviation de N divisions sur l'échelle de l'instrument, et que, l'ayant refroidi de $t°$, cette déviation devienne $N + n$, l'accroissement de force x produite dans l'aimant, dont la force était d'abord f, s'obtiendra par la proportion $N : n = f : x$; d'où $x = fn : N$. L'augmentation de force pour 1° seulement sera donc $fn : Nt$.

Afin d'avoir plus de sensibilité, on fait agir de chaque côté de l'aiguille deux aimants capables de la dévier, chacun de tN divisions, et qui, agissant ensemble, la laissent en équilibre. Si l'on veut refroidir un des aimants, de manière qu'il augmente à lui seul la déviation de N divisions, il suffira de le refroidir de 1°, au lieu de $t°$, la déviation qu'il produisait d'abord étant t fois plus grande que dans le cas précédent. En réunissant donc les deux barreaux, la déviation sera N quand on refroidira l'un d'eux de 1° seulement.

On a trouvé par la méthode précédente que : 1° une même variation de température change d'une manière plus marquée la force des aimants faibles que celle des aimants puissants ; 2° les changements d'intensité ne suivent pas les mêmes lois quand on refroidit ou quand on échauffe les barreaux aimantés ;

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXX, p. 113.

3° les changements de force ne se produisent pas instantanément; d'abord rapides, ils continuent de plus en plus lentement pendant longtemps, aprés que la température a été modifiée.

Influence de la température d'aimantation. — Les expériences sur les changements passagers d'intensité des aimants sous l'influence de la chaleur, ont souvent donné des anomalies, dont M. Dufour a trouvé la cause, en opérant par la méthode que nous avons indiquée plus haut (1229)[1]. Il a d'abord reconnu la nécessité de considérer la température à laquelle le barreau a été aimanté, et il a constaté, ce qui a été confirmé par M. Wiedmann, que *le refroidissement au-dessous de la température à laquelle a été faite l'aimantation, affaiblit les aimants*, comme l'échauffement. Par exemple, le barreau ayant été aimanté à 55°, puis porté à 28°, 15°, 0°, les intensités magnétiques, en prenant celle de la terre pour unité, ont été 1,228 ; 1,219 ; 1,213, et 1,208. Un barreau aimanté à 6 ou 8°, a donné à 4° et à — 25°, les intensités 5,08 et 4,90. La température d'aimantation correspond donc à un *maximum* d'intensité, à partir duquel il y a *toujours* un affaiblissement passager quand la température s'élève ou s'abaisse. Du reste, le refroidissement altére moins l'intensité que l'échauffement. Il résulte de là que les coefficients d'une formule de correction établie pour les températures supérieures au *point d'aimantation*, ne conviendront pas pour les températures inférieures.

Un second fait important, constaté par M. Dufour, c'est que les oscillations de la température au-dessus du point d'aimantation sont suivies d'un affaiblissement *permanent* du barreau, d'abord rapide, puis très faible, sans pourtant qu'il paraisse jamais devenir nul. Quand on opére au-dessous du point d'aimantation, l'aimant arrive promptement à un état stable, l'intensité étant dés lors constante pour une même température. De plus, l'aimant paraît insensible aux variations de température inférieures au point d'aimantation, et d'autant plus que l'aimantation a été faite à une température plus élevée. Si, par exemple, elle a eu lieu à 55°, les variations d'intensité pour 1° ne sont que 0,000066, et restent tout à fait insensibles même pour 20 à 30°. Il faut remarquer cependant que, d'aprés les expériences de M. Wiedmann, des variations fréquentes de température au-dessous du point d'aimantation donnent au barreau la propriété de s'affaiblir par l'échauffement, comme si le point d'aimantation avait été abaissé.

Il résulte de là qu'une aiguille destinée à étudier le magnétisme terrestre devra être de préférence aimantée à une température *supérieure* à celles qu'elle aura à subir; et qu'il faudra préalablement faire varier 20 à 30 fois sa température, entre le point d'aimantation et la température la plus basse qu'elle pourra avoir à supporter.

[1] *Bibl. de Genève* (arch. des sc.), t. XXXI, 105, et XXXIV, 5.

§ 5 — ÉTUDE DU MAGNÉTISME TERRESTRE.

I. Précautions à prendre dans les observations magnétiques.

1231. L'étude du magnétisme terrestre, indépendamment de son importance pour la navigation, à cause de l'usage de la boussole, offre à l'esprit un intérêt scientifique d'autant plus élevé, qu'il s'agit d'un phénomène qui embrasse toute la surface du globe. Cette étude se réduit à l'observation de trois termes, qui sont la *déclinaison* de l'aiguille aimantée, son *inclinaison*, et l'*intensité* du magnétisme terrestre. Des navigateurs ont profité de leur passage dans les différentes mers, et des relâches sur les côtes de divers pays, pour déterminer la valeur de ces trois termes; des voyages autour du monde ont même été entrepris dans le but spécial de recueillir des données relatives à ce grand problème. Après avoir obtenu un nombre considérable de résultats dans toutes les parties du monde, on a tracé, sur des globes terrestres, des lignes passant par tous les points où la déclinaison, l'inclinaison ou l'intensité présentent la même valeur à une même époque. Ces lignes, reproduites ensuite sur des cartes, permettent de comparer les résultats, et d'en embrasser l'ensemble d'un seul coup d'œil.

La plupart des observations étant faites sur des navires, les masses de fer qu'ils contiennent occasionnent des erreurs qu'il faut savoir éviter ou corriger; telle est la question qui va d'abord nous occuper.

1232. Influence du fer des vaisseaux sur l'aiguille aimantée. — Le fer que contiennent les vaisseaux agit sur l'aiguille aimantée de trois manières différentes : 1° comme fer doux éprouvant une décomposition magnétique de la part des pôles de l'aiguille; 2° comme aimant permanent, le fer n'étant pas entièrement dépourvu de force coërcitive, puisqu'on l'a plus ou moins écroui en le travaillant; 3° comme formant, sous l'influence du globe, un aimant temporaire, dont la position des pôles dépend de l'orientation du navire. — Le premier effet est très faible, et peut être évité en éloignant toute pièce de fer, de l'aiguille aimantée. Le second n'a aussi que peu d'influence; s'il était seul, on pourrait en tenir compte, en faisant tourner le navire sur lui-même, et prenant la moyenne des positions extrêmes que prendrait alors l'aiguille par rapport au méridien, en se servant des méthodes astronomiques. En effet, les diverses actions exercées par les pièces aimantées du navire, peuvent être regardées comme donnant un couple résultant, qui se combine avec celui de l'action terrestre. Le troisième effet est le plus important, d'autant plus qu'il change avec la latitude, en même temps que la composante horizontale de la force directrice de l'aiguille (1218).

On a été longtemps avant de se douter des erreurs apportées aux indications

des boussoles par le fer des vaisseaux ; ce qui tient à l'imperfection et au peu de sensibilité des anciens instruments, et aussi, sans doute, à ce que l'on employait autrefois beaucoup moins de fer dans les navires. Aujourd'hui qu'on remplace les caisses à eau en bois par des caisses en tôle, qu'on emploie des canons en fer, des chaînes au lieu de câbles pour les ancres qui sont plus fortes et plus nombreuses..., les erreurs sont considérables, et peuvent aller à 15 ou 20°. Cependant, dès 1666, un hydrographe dieppois, Guillaume Denys, faisait remarquer que deux boussoles placées en deux points éloignés d'un navire n'étaient pas d'accord. L'astronome Wales, qui accompagna Cook dans ses voyages, s'est spécialement préoccupé de l'influence perturbatrice du fer sur les observations magnétiques. Walker cite un rapport, fait, en 1794, par un maître timonnier nommé Dewnie, dans lequel cette influence est signalée, et où il est dit qu'elle dépend du navire, et que deux navigateurs qui croient suivre la même route d'après leur boussole, suivent rarement des directions parallèles. Plus tard, en 1801, le capitaine Flinders mesura les erreurs dans différentes orientations du navire, reconnut qu'elles sont beaucoup plus étendues qu'on ne le croyait, et essaya de les éviter par une méthode analogue à celle qui fut suivie plus tard par Parry et par Duperrey.

Depuis, une foule de navigateurs, parmi lesquels Ross, Parry, Duperrey, Sabine, se sont occupés du même sujet. Parry éloignait toute pièce de fer de la boussole, remplaçait les canons de fonte de l'arrière par des canons en bronze, et atténuait ainsi les erreurs. Pour se rendre compte de leur importance, il comparait les indications de la boussole du navire, auquel il donnait successivement différentes orientations, à celles d'une autre boussole fixée sur le rivage. Pour cela, deux observateurs placés auprès des boussoles, visaient l'un à l'autre, au moyen d'une lunette, à un signal donné, et chacun d'eux observait l'angle que faisait son aiguille avec l'axe commun des deux lunettes. La boussole que nous décrirons plus loin (*fig.* 902) est très propre à ces sortes d'expériences. La plus grande différence entre les déclinaisons données par les deux instruments était de 4°,15 ; ce maximum avait lieu quand l'axe du navire était dirigé de l'est à l'ouest. La différence était presque nulle quand cet axe était dirigé du nord au sud. Des expériences analogues, faites dans la baie de Baffin, où l'inclinaison était de 84°,25′, ont donné plus de 16° de différence dans la première position de l'axe, la différence étant toujours à peu près nulle dans la seconde.

Méthode de Duperrey. — Avant d'entreprendre son voyage de circumnavigation, destiné spécialement à des observations magnétiques, cet illustre navigateur chercha à se mettre à l'abri des erreurs produites par le fer de sa corvette. Il supprima les canons du gaillard d'arrière, et fit clouer et cheviller en cuivre tout l'espace qui entourait la boussole jusqu'à 3 ou 4 mètres de distance. Ces précautions suffirent pour rendre les erreurs faibles ; car, ayant fait tourner la corvette sur elle-même par une mer calme, et comparé la direction de l'aiguille de déclinaison à celle du plan vertical passant par le soleil

couchant, la plus grande différence observée fut de 1°,25′ quand l'axe du navire était dirigé de l'O. NO. à l'E. SE. Ces observations étaient faites tout près de l'équateur. Aux îles Malouines, par 51° de latitude australe, la plus grande différence ne fut que de 0°,25′. L'*inclinaison* n'était aussi que très peu altérée : des observations faites en 17 stations, de l'équateur à la latitude australe de 43°, ont donné, à Payta, 42′,4 pour la plus grande différence entre l'inclinaison à bord et l'inclinaison observée sur la côte voisine. On a remarqué que les différences sont plus grandes, à égalité de latitude, au nord de l'équateur magnétique qu'au sud. De plus, l'inclinaison est généralement plus petite à bord qu'à terre dans l'hémisphère austral, contrairement à ce qui a lieu dans l'hémisphère boréal.

1233. Méthode de M. Barlow. — M. Barlow, après de longues recherches, est parvenu à compenser directement les effets du fer des navires; son travail, couronné par l'Institut de Londres, a été publié en 1823. M. Barlow a commencé par étudier l'action sur une petite aiguille aimantée, de globes de fer (bombes, boulets) placés dans différentes positions et toujours à la même distance de son axe. Il a reconnu que ces globes présentaient deux pôles produits par la force magnétique terrestre, et placés sur un diamètre parallèle à cette force. L'aiguille n'est pas influencée quand son point de suspension se trouve dans le plan de la ligne neutre du globe de fer, ou dans le méridien magnétique qui passe par son centre ; ce qu'il est facile d'expliquer en supposant l'aiguille assez éloignée du globe, pour que l'action de ce dernier forme un couple.

M. Barlow se convainquit alors que l'action du fer des navires provient de la polarité magnétique que lui communique la terre, et que l'effet résultant est le même que celui d'un aimant dont l'axe serait dans le méridien magnétique et changerait par rapport à l'axe du navire, avec la position de ce dernier. Il conçut alors l'idée de produire les mêmes effets, au moyen d'une masse de fer convenablement placée, qui, éprouvant les mêmes modifications magnétiques lors des changements de latitude, devrait toujours conserver la même position pour produire le même effet. Cette masse de fer se nomme *compensateur magnétique* ou *plaque de correction*.

Description et usage de la plaque de correction. — Cet appareil se compose de deux plaques circulaires en fer c, c' (*fig.* 900) de 30^{cm} environ de diamètre, séparées par une lame de bois et traversées au centre par une tige de cuivre t, de 4^{cm} de diamètre. Les deux plaques sont pressées l'une contre l'autre par des écrous tournant sur cette tige, et par trois petites vis placées près des bords. On commence par prendre note des déviations produites par l'action du fer, dans les différentes positions du vaisseau, en comparant, comme ci-dessus, la boussole qui est à bord, à une autre boussole placée sur le rivage. On transporte ensuite la boussole du navire à la place de l'autre, et on la pose sur un socle en bois (*fig.* 900) pouvant tourner sur lui-même, et percé de plusieurs trous. On cherche ensuite, par tâtonnement, dans quel trou et à

quelle profondeur il faut enfoncer la tige de la plaque *cc'*, pour que l'aiguille aimantée éprouve, quand on fait tourner le socle, des déviations égales à celles qu'elle éprouvait à bord. On mesure ensuite exactement la distance du centre de la plaque à la verticale et à l'horizontale qui passent par le centre de l'aiguille. On reporte ensuite la boussole dans le navire, et l'on ajuste le compensateur sur le trépied qui la supporte, de manière qu'elle ait la même position relative, comme on le voit en *ct* (*fig.* 901). On voit que la plaque ajoutant son effet à celui du fer du vaisseau, l'erreur sera doublée. On pourra donc toujours la connaître, en faisant deux observations de déclinaison, l'une après avoir enlevé la plaque, l'autre après l'avoir mise en place. La différence entre les deux résultats sera le double de l'erreur cherchée. On prendra donc la moitié de cette différence, et on la retranchera de la déclinaison observée sans la plaque, si elle a été augmentée quand on l'a adaptée, et on l'ajoutera dans le cas contraire.

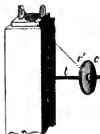


Fig. 900.

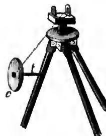


Fig. 901.

Par cette méthode ingénieuse, on ne corrige les erreurs que d'une manière approximative, parce que : 1° l'état de la plaque de correction est lui-même modifié par le fer du vaisseau, et d'une manière qui varie avec son orientation; 2° la force coërcitive qui peut exister dans les masses de fer change avec la température; 3° des différences imperceptibles en certains pays peuvent devenir sensibles dans des latitudes plus élevées, où l'influence que l'on veut combattre est beaucoup plus prononcée. Il est donc très utile de régler de nouveau la position de la plaque de correction, quand on s'éloigne beaucoup des lieux où elle avait été réglée d'abord; 4° le déplacement de masses de fer assez considérables, par exemple d'une ancre que l'on jette à la mer et de sa chaîne, suffit pour que la correction devienne inexacte. Il résulte de là que, toutes les fois qu'il sera possible, il vaudra mieux observer à terre.

Poisson a appliqué le calcul au compensateur de M. Barlow, et il en a expliqué l'efficacité, en montrant qu'une masse unique de fer convenablement placée, peut annuler les effets d'un nombre quelconque de masses de fer irrégulièrement distribuées dans un navire, quelle que soit la position de ce dernier.

1234. Influence du fer des vaisseaux sur la marche des chronomètres. — Les chronomètres qui servent dans la détermination des longitudes renferment des pièces d'acier qui deviennent magnétiques, et sont influencées ensuite par le fer du vaisseau, de manière que leur marche est modifiée.

L'erreur peut aller jusqu'à 10ˢ par jour. Le capitaine Buchan paraît avoir, le premier, observé ces irrégularités des chronomètres, lors de son voyage au pôle nord; il constata qu'ils ne marchaient pas de la même manière à bord et sur la côte. MM. Barlow et Evans ont vu le mouvement être tantôt accéléré, tantôt retardé. M. Fisher a toujours obtenu une accélération en plaçant des masses de fer près de l'instrument. Cependant, il paraît constant qu'il y a retard dans presque tous les cas; un boulet placé à 54 ou 81 centimètres d'un chronomètre, peut le retarder de 4ˢ par jour.

Des expériences de M. Fisher, et de M. Frodsham, sur des parties détachées d'un chronomètre, ont montré que l'action perturbatrice se produit sur le balancier et son ressort; car cette action disparaît, quand on emploie un balancier en cuivre, même lorsqu'on en approche un aimant.

Pour éviter les erreurs dont il s'agit, il faut éloigner le chronomètre de toute masse de fer, ou le poser sur un support muni d'une plaque de compensation capable de détruire l'action du fer du navire sur une boussole qu'on mettrait à sa place

II. De la déclinaison.

1235. BOUSSOLES DE DÉCLINAISON. — Relativement à la déclinaison, il y a à observer ses différentes valeurs aux divers points de la surface du globe, et ses variations. Les instruments destinés à mesurer la déclinaison se nomment *boussoles de déclinaison*. La *fig.* 902 représente un de ces instruments : *rfr'* est une boîte circulaire en cuivre[1], au centre de laquelle est suspendue, sur une pointe, une aiguille horizontale dont les extrémités parcourent un cercle divisé en degrés ; une glace préserve

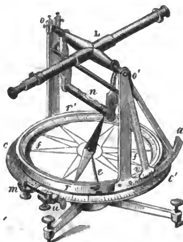


Fig. 902.

cette aiguille des agitations de l'air. La boîte *rfr'* peut tourner autour d'un axe vertical, fixé en dessous à son centre, et engagé dans un tube porté par le pied de l'instrument; elle est munie de deux verniers opposés, qui parcourent les divisions d'un cercle horizontal *cc'* fixé par 6 bras au pied de l'instrument.

[1] On évite d'employer le laiton, parce que le zinc qui entre dans sa composition contient quelquefois des parcelles de fer qui dévient l'aiguille aimantée. On a vu des boussoles où ce défaut était tellement prononcé que l'aiguille tournait avec la boîte de laiton, et pouvait s'arrêter dans toutes les positions.

L'un des verniers *m* est muni d'une pince, que l'on peut fixer au cercle *cc'* au moyen d'une vis de pression, et qui porte une vis de rappel *u* qui permet de donner avec précision à la boîte *rfr'* la position désirée. Cette boîte porte deux montants verticaux qui soutiennent une lunette à réticule L, mobile autour d'un arbre horizontal *oo'* parallèle au cercle *cc'*. Un niveau à bulle d'air *n*, soutenu par des crochets qui s'appuient sur deux parties de l'arbre *oo'* tournées avec soin et de même diamètre, sert à reconnaître si cet arbre est parfaitement horizontal. L'axe optique de la lunette décrit alors dans ses mouvements autour de *oo'*, un plan vertical qui passe par le centre de la boîte *rfr'*. Une ligne diamétrale, tracée sur le fond de cette boîte, figure la trace de ce plan sur le fond ; on la nomme *ligne de foi*. Le levier *o'v* fixé à l'extrémité de l'arbre *oo'*, et muni d'un vernier *v* qui parcourt les divisions du quart de cercle *a*, fait connaître l'angle que fait la lunette avec l'horizon.

La figure 903 représente en *sn* l'aiguille de la boussole. Cette aiguille a la forme d'un losange ; on en voit la coupe verticale en SN. Au centre de figure est un trou circulaire par lequel on peut l'ajuster exactement sur la chappe *c*, ou l'en séparer à volonté. La chappe est formée d'une agate creusée pour recevoir la pointe du pivot, et enchâssée dans un petit plateau en cuivre qui se relève autour d'elle, de manière à former un cylindre vertical exactement de même diamètre que le trou central de l'aiguille. Un petit levier *e*, *e* (*fig.* 902 et 903), terminé par un anneau qui entoure le pivot, s'élève, quand on appuie sur l'extrémité, qui sort de la boîte *rfr'*, de manière à soulever la chappe et à l'empêcher de porter sur la pointe quand on ne se sert pas de l'instrument.



Fig. 903.

Pour observer, on installe la boussole, au moyen des vis calantes que portent ses trois pieds, de manière que le niveau *n* soit horizontal dans toutes les positions de la boîte *rfr'*. On cherche ensuite l'angle que fait l'aiguille aimantée avec le plan vertical qui passe par une étoile connue. Pour cela, on fait tourner la boîte *rfr'* de manière à amener le centre du réticule sur l'étoile, et l'on observe l'angle que fait alors la ligne de foi avec l'aiguille aimantée. Il reste ensuite à trouver, par les moyens astronomiques, l'angle que fait le vertical de l'étoile, à l'heure de l'observation, avec le méridien géographique. Cet angle est ajouté au premier angle observé, quand le méridien se trouve du même côté de l'aiguille que le plan vertical observé ; on l'en retranche dans le cas contraire.

Méthode de retournement. — Dans cette manière d'opérer, on observe en réalité l'angle que fait la ligne de foi avec l'*axe de figure* de l'aiguille. Mais il peut arriver que cet axe ne coïncide pas avec l'axe magnétique ; par exemple, ce dernier peut être dirigé suivant *oo'* (*fig.* 903). Pour éviter cette cause d'erreur, après avoir observé l'angle que fait l'axe de figure avec la ligne de

foi, on enlève l'aiguille de dessus la chappe, et on l'y remet après l'avoir retournée de manière que la face qui était en dessus se trouve en dessous. L'axe magnétique prendra spontanément la même direction que dans la première observation, mais l'axe de figure aura une position différente, que nous trouverons en faisant tourner l'aiguille *ns*, autour de *oo'*, de manière qu'elle vienne en *n's'*. On voit que l'axe magnétique divise en deux parties égales l'angle des axes de figure *ns*, *n's'*. L'angle formé par l'axe magnétique avec la ligne de foi est donc la moyenne entre les angles que fait successivement l'axe de figure avec la même ligne, quand on retourne l'aiguille.

Boussole de déclinaison de Gambey. — Dans cet instrument beaucoup plus précis que le précédent, l'aiguille est remplacée par un petit barreau suspendu, suivant la méthode de Coulomb, par un paquet de fils de soie sans torsion. Ces fils s'enroulent sur un petit treuil *e*, dont le support peut tourner sur lui-même, pour supprimer la torsion s'il y en avait une. Ce fil traverse un châssis *v* fermé de chaque côté par des glaces, et porté par la boîte BB', qui peut tourner autour d'un axe vertical soutenu par le pied de l'instrument. Deux verniers fixés à la boîte, et dont un est muni d'une vis de rappel, parcourent les divisions d'un cercle azimutal fixe *c*. L est une lunette avec laquelle on vise un objet éloigné, pour vérifier si l'instrument ne s'est pas déplacé pendant les observations. L' est une lunette dont l'axe optique décrit un plan vertical quand son axe de rotation est horizontal; un niveau placé au-dessus, fait connaître si cette condition est remplie. L'aimant est un barreau de 50cm de longueur, de 15mm de largeur, et de 3mm,5 d'épaisseur. Il est posé sur un double crochet suspendu aux fils de soie, de manière qu'on peut le faire tourner sur lui-même pour appliquer la méthode de retournement. Aux extrémités de cet aimant sont des anneaux en cuivre avec des fils croisés, comme on le voit en A. *l*, *l* sont des ouvertures obliques garnies de glaces, par lesquelles on aperçoit les fils croisés. Deux autres ouvertures, *t*, servent à introduire les doigts pour arrêter les oscillations. Il en existe encore deux autres, en dessous, par lesquelles on éclaire les fils, en renvoyant la lumière au moyen d'une feuille de papier.

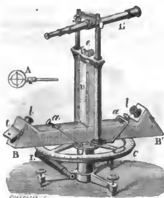


Fig. 904.

Pour observer, on commence par viser une étoile connue, au moyen de la lunette L', et l'on note la division qui correspond au vernier. On remplace ensuite la lunette L' par un microscope, et l'on vise, par l'une des ouvertures *l*, le point de croisement des fils qui sont à l'extrémité de l'aimant, en faisant

tourner la boîte BB, jusqu'à ce que ce point coïncide avec le centre du réticule du microscope. La quantité dont on fait tourner la boîte BB donne alors l'angle que fait l'axe de l'aimant avec le vertical de l'étoile. On fait une seconde observation en visant l'autre extrémité de l'aimant, et l'on prend la moyenne, afin d'éviter l'erreur qui pourrait provenir de ce que la ligne, passant par les centres des anneaux de cuivre, ne serait pas exactement dans le plan vertical que décrit l'axe de la lunette. On recommence enfin, aprés avoir retourné l'aimant sur lui-même.

Au lieu de remplacer la lunette par un microscope, on dispose au centre de l'objectif, ou lentille tournée vers les objets, une seconde lentille plus petite que l'on couvre d'un écran quand on vise une étoile, tandis qu'on la découvre en cachant la partie extérieure de l'objectif, pour observer les extrémités de l'aimant, la lunette étant ainsi changée en microscope.

1236. Boussole marine. — Cet instrument, connu aussi sous le nom de *compas des variations*, se compose d'une boîte cylindrique en cuivre BB (*fig.* 905), soutenue par une suspension de Cardan, c'est-à-dire mobile autour de deux axes horizontaux perpendiculaires l'un à l'autre; l'un dirigé suivant un diamétre de la base supérieure de la boîte, porte sur un anneau mobile autour d'un axe *o* perpendiculaire à ce diamétre et porté par un second anneau *aa'*. Ce mode de suspension fait que la base supérieure de la boîte BB reste horizontale, de quelque manière que s'incline le navire. L'anneau *aa'* est fixé, par des montants verticaux, à un plateau qui peut tourner sur lui-même. Le fond de la boîte BB porte un pivot sur lequel est suspendue l'aiguille aimantée. Sur cette aiguille est collé un disque de papier rendu rigide par une lame de talc trés mince, et sur laquelle sont tracés les degrés de la circonférence et les signes des vents. Le zéro de la division correspond à l'axe de l'aiguille aimantée, dont l'extrémité nord est indiquée par un signe particulier. Deux pinnules sont placées aux extrémités d'un même diamétre de la boussole; l'une, *f*, présente une fenêtre au milieu de laquelle est tendu un fil vertical; l'autre, à laquelle on applique l'œil, est formée d'une plaque munie d'une fente verticale trés fine, derrière laquelle est disposé un petit miroir *n* incliné à 45°. Le tain de ce miroir est enlevé suivant une ligne correspondante à la fente, de manière qu'on peut voir le fil vertical de la pinnule *f*. — Pour observer, on fait tourner la boussole sur elle-même, et l'on vise à travers les deux pinnules *e*, *f*, comme on le voit dans la coupe qui se trouve au bas de la figure, une étoile ou un objet *s* placé à 15 ou 20° au-dessus de l'horizon, en plaçant l'œil en *v*. En même temps, on aperçoit dans le miroir *n'* l'image de la ligne de foi tracée en dedans de la boîte,

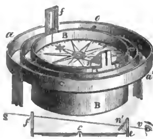


Fig. 905. — 1/10.

et la division de la rose qui coïncide avec cette ligne de foi. On voit ainsi d'un seul coup-d'œil l'angle que fait l'aiguille aimantée avec le vertical de l'astre ou de l'objet visé. Il reste à trouver, par les moyens ordinaires, l'angle de ce vertical avec le méridien géographique.

Quand la boussole doit servir simplement à indiquer l'angle que fait l'axe du navire avec le méridien, il n'y a plus de pinnules; l'intérieur de la boîte porte seulement une ligne de foi dirigée suivant l'axe du navire, et l'on observe l'angle que fait l'aiguille avec cette ligne, ensuite on en retranche ou on y ajoute la déclinaison supposée connue. La figure 906 représente une boussole marine ordinaire. Pendant la nuit, on l'éclaire au moyen d'une lampe, dont la lumière pénètre, par l'ouverture *ac*, dans la boîte qui renferme l'instrument, et vient éclairer par dessous le disque divisé, en passant à travers le fond, qui est formé d'une lame de verre dépoli.

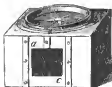


Fig. 906. — 1/18.

Dans les navires à hélice, le mouvement rapide du propulseur produit à l'arrière une trépidation qui agite continuellement l'aiguille de la boussole; on évite cet inconvénient en la soutenant par un flotteur posé sur un liquide. L'eau se congelant facilement et l'alcool s'évaporant, M. Santi a eu l'heureuse idée de remplacer ces liquides par la glycérine qui ne présente pas les mêmes inconvénients.

Des aiguilles des boussoles. — La forme de losange est la plus convenable, d'après les expériences de Coulomb (1225). Le même physicien a reconnu que le frottement sur le pivot est proportionnel au poids de l'aiguille, quand la pointe est un peu usée; et, comme la force magnétique diminue moins rapidement que l'épaisseur, il y a tout avantage à employer des aiguilles très minces. Quand elles ont une forme prismatique, la longueur est à peu près indifférente; car la force directrice est proportionnelle à cette longueur, aussi bien que le poids. La chappe se fait en laiton, en agate, en verre; elle est creusée en dessous, et la cavité tournée avec soin a la forme d'un cône très évasé. La pointe du pivot doit être un peu arrondie; l'angle au sommet est ordinairement de 15 à 20°; on la fait moins effilée pour les usages de la mer, où les agitations la fatiguent beaucoup plus, et l'on remplace l'acier par le laiton, l'acier s'oxydant rapidement par l'air de la mer. Pour empêcher l'inclinaison, on ajoute, d'un côté de l'aiguille, un petit coutrepoids, qu'on doit éloigner du centre quand on s'avance notablement vers le pôle.

1237. Usages et origine de la boussole. — Indépendamment de ses usages en mer, la boussole sert à se diriger dans les voyages à travers les continents. Les géologues en font souvent usage pour reconnaître la direction des chaînes de montagnes, des collines ou des vallées. On se sert, dans ce cas, de petites boussoles ayant la forme et les dimensions d'une montre ordinaire. — La *fig.* 907 représente une *boussole d'arpenteur*. La ligne de foi est paral-

lèle à l'un des côtés de la boîte, auquel est fixée une petite lunette à réticule qui sert à viser dans la direction dont on veut avoir l'orientation par rapport à l'aiguille aimantée. Cette lunette est souvent remplacée par une simple alidade à pinnules.

Il règne beaucoup d'incertitudes sur l'époque de la découverte de la direction de l'aiguille aimantée. La boussole était connue en Europe et en usage dans la navigation, au XIIe siècle; on la désignait sous le nom de *guide-aimant*, *marinière* ou *marinette*. Guyot de Provins en parle formellement vers 1180, dans un petit poéme en langue gauloise, où il dit que l'aiguille tourne constamment sa pointe du côté de l'étoile polaire [1]. On a donc tout lieu de croire que la boussole a d'abord été connue en France vers le commencement du XIIe siècle, d'autant plus que la fleur de lis, qui indique le pôle nord de l'aiguille, a été adoptée dans tous les pays. Cependant, on a attribué l'invention de la boussole à Flavius Gioja d'Amalfi; mais il y a évidemment erreur, puisque ce navigateur vivait au XIVe siècle. Tout ce qu'on peut lui accorder, c'est d'avoir suspendu l'aiguille sur un pivot, de manière qu'on pût l'observer constamment; tandis qu'auparavant, on la faisait flotter sur l'eau au moment où l'on voulait observer. On a prétendu aussi que les Chinois se dirigeaient au moyen de la boussole, à travers les steppes de la Tartarie, plus de 1000 ans avant notre ère. On s'appuie sur des documents publiés par Duhalde dans sa *Description de la Chine*, et sur divers passages de l'*Encyclopédie japonaise*, qui parlent de chars, en avant desquels était une petite figure mobile, dont le bras étendu indiquait le sud. On ajoute que Marco Paolo, qui allait en Chine par la mer Rouge, avait pu en rapporter cette invention; mais ce célèbre voyageur ne revint en Europe qu'en 1295. Des critiques très érudits ont soutenu, au contraire, que les Chinois ont connu la boussole par leurs relations avec les Européens, et que les documents dans lesquels ils s'en attribuent l'invention, ont été fabriqués et intercalés aprés coup, par orgueil national. En effet, les Chinois font flotter l'aiguille sur l'eau, comme on l'a fait d'abord en Europe, et ils n'ont pas de mot particulier pour nommer la boussole, qu'ils désignent par une périphrase [2].


Fig. 907. — 1/12.

Cependant de Humboldt admet que les Chinois ont connu l'art de se diriger sur les continents au moyen de l'aimant, plus de 1000 ans avant notre ère, et qu'au IIIe siècle, c'est-à-dire plus de 700 ans avant l'introduction de la boussole en Europe, leurs jonques naviguaient sur l'océan indien en se servant de l'indication magnétique du sud [3].

1 . . . . Dont font à l'aiguille allumer.
Quand la mer est obscure et brune, Puis n'ont-ils gardo d'esgarer.
Quand ne voit estoile ne lune, Contre l'estoile va la pointe.

2 *Dissertation sur l'origine de la boussole*, par D.-A. Azuni, 1819.

3 *Examen critique de l'hist. de la géographie*, t. III, p. 36.

Nous trouvons enfin dans les œuvres d'Albert-le-Grand, un passage d'où il semble résulter que les anciens occidentaux ont connu la direction de l'aiguille aimantée, et en faisaient usage sur mer [1]. Le traité des Pierres d'Aristote, d'où ce passage est tiré, est actuellement perdu. La précieuse propriété de l'aimant, oubliée pendant des siècles, aurait été retrouvée au XIIe siècle, peut-être d'après les indications d'Aristote, dont les ouvrages furent révélés aux Européens vers cette époque par Albert-le-Grand, qui les a commentés d'après une traduction arabe. Il ne serait pas étonnant dès-lors que les Chinois et les Indiens eussent connu la boussole avant les Européens; Aristote en aurait eu communication pendant la conquête de l'Inde par son élève Alexandre-le-Grand.

1238. DE LA DÉCLINAISON EN DIFFÉRENTS LIEUX. — Nous avons déjà dit (1202) que la déclinaison est différente aux divers points de la surface du globe. Les premières observations suivies, sur ce sujet, ont été faites en 1599, d'après les ordres du prince de Nassau, par les navigateurs hollandais. On était encouragé dans ces sortes de recherches par l'idée que la déclinaison sous une latitude donnée pourrait faire connaître la longitude; mais la découverte des variations de la déclinaison en un même lieu a fait renoncer à cette espérance. Halley, voulant vérifier certaines idées théoriques sur ces variations, entreprit un long voyage sur un navire que lui confia le gouvernement anglais, et en réunissant à ses résultats ceux qui avaient été obtenus antérieurement par divers navigateurs, il dressa des cartes sur lesquelles étaient tracées de 5 en 5°, les lignes d'*égale déclinaison* ou *isogonique*. Ces cartes, les premières dans ce genre, firent sensation à l'époque où elles parurent; mais l'imperfection des méthodes d'observation, dans lesquelles on n'avait pas tenu compte de l'influence du fer du vaisseau, puis les changements qu'éprouve la déclinaison en un même lieu, les firent bientôt trouver inexactes. Mountain et Dodson publièrent de nouvelles cartes en 1745 et 1746, et M. Hansteen, en 1787, fit paraître un Atlas magnétique plus complet que tout ce qui avait été fait jusque-là. Churchman, en 1794, dressa aussi des cartes magnétiques, et essaya de trouver les lois de la déclinaison, en partant de l'existence de deux pôles magnétiques, qu'il supposait tourner autour des pôles terrestres, celui du nord en 1096 ans, et celui du sud, en 2289 ans.

Lignes isogoniques. — M. Barlow a fait, en 1823, un grand travail sur les déclinaisons aux divers points de la surface du globe. C'est d'après les cartes qu'il a publiées qu'a été faite la *fig.* 908. Les lignes ponctuées représentent des *lignes isogoniques*. On voit combien elles sont irrégulières; mais il

[1] Adhuc autem Aristot. in lib. de lapidibus dicit : Angulus magnetis cujusdam est, cujus virtus apprehendendi ferrum est ad zoron, hoc est, septentrionalem : et hoc utuntur nautæ : angulus verò alius magnetis illi oppositus trahit ad aphron, id est, polum meridionalem : et si approximes ferrum versus angulum zoron convertit se ferrum ad zoron : et si ad oppositum angulum approximes, convertit se directè ad aphron.

Beati Alberti magni, etc. op. l. II, *de mineralibus tractatus* 2, cap. VI.

faut remarquer que leurs formes sont altérées, dans les latitudes élevées, par le système de projection de Mercator, adopté dans cette carte.

Ligne sans déclinaison. — Parmi les lignes isogoniques, il faut remarquer les *lignes sans déclinaison*, c'est-à-dire la série des points sur lesquels l'axe de l'aiguille aimantée coïncide avec le méridien géographique. Une de ces lignes, représentées sur la figure en traits continus, commence au nord-ouest de la baie d'Hudson, traverse le Canada, coupe l'Amérique méridionale près du cap Saint-Roch, et vient rencontrer le méridien de Paris vers le 65e degré de latitude australe. Une deuxième ligne sans déclinaison, partant au sud, du point *a*, traverse la Nouvelle-Hollande, enveloppe dans une vaste

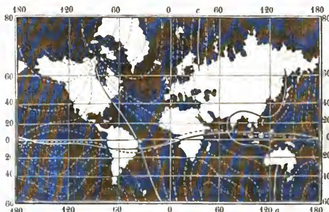


Fig 908.

sinuosité, du côté de l'ouest, les îles de l'Océanie et les deux Indes, puis remonte au nord, longe le Japon, et vient aboutir à la Sibérie. Une autre branche, dont on voit l'extrémité en *c*, traverse la mer Blanche. On pense qu'elle n'est que la continuation de la courbe de l'Océanie, à laquelle elle se joindrait à travers l'Asie continentale, où les observations manquent. Il y a donc deux systèmes de lignes sans déclinaison; on peut les regarder comme se continuant l'une avec l'autre par les régions polaires, de manière à ne former qu'une seule courbe faisant le tour de la terre.

Les lignes sans déclinaison se déplacent lentement de l'est à l'ouest; celle de l'Océan Atlantique passait par Paris en 1663. Du reste, ces déplacements ne sont pas les mêmes dans toute l'étendue d'une même courbe; car la déclinaison n'a pas varié sensiblement à la Nouvelle-Hollande, depuis un grand nombre d'années; ni dans la partie occidentale des Antilles et au Spitzberg, pendant tout un siècle. Les *lignes isogoniques* se déplacent, en même temps que les lignes sans déclinaison. En général, quand une ligne isogonique passe de la mer sur une terre un peu étendue, elle s'y arrête pendant longtemps, et

s'y courbe de plus en plus, les autres parties continuant à obéir au mouvement séculaire.

Entre les deux lignes sans déclinaison de la figure, c'est-à-dire dans l'Océan Atlantique et dans presque tout l'ancien continent, la déclinaison est occidentale ; en dehors, elle est orientale ; et elle diminue à mesure qu'on s'approche de ces lignes. Dans l'Océan Pacifique, on remarque des courbes fermées enveloppant les îles Marquises, et dans lesquelles la déclinaison diminue à mesure que ces courbes se resserrent : ce sont les *ovales* de la mer du sud signalés par A. Erman. Il y en a de semblables, mais moins étendus, au nord-est de l'Asie ; seulement, la déclinaison augmente de dehors en dedans.

Méridiens magnétiques vrais et parallèles magnétiques. — Duperrey, au retour de son voyage de circumnavigation sur la corvette

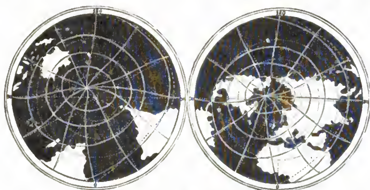


Fig. 909.

la Coquille, a publié de nouvelles cartes des déclinaisons, dans lesquelles il a figuré des courbes analogues aux lignes isogoniques, mais tracées de manière à faire connaître en chacun de leurs points la direction du méridien magnétique. Ces lignes, qu'il nomme *méridiens magnétiques vrais*, sont celles que l'on obtiendrait en transportant l'aiguille aimantée du nord au sud, de manière à suivre constamment la direction qu'elle indique. Ce sont des courbes à double courbure, tandis que les méridiens magnétiques proprement dits sont de grands cercles. Quelques méridiens magnétiques vrais ont été représentés en lignes pleines, sur la carte à projection polaire de la *fig.* 909. On reconnaît, à leur inspection, qu'il y a peu de points où l'aiguille aimantée se dirige exactement vers le nord. En réunissant ces points par des courbes, on retrouverait les lignes sans déclinaison.

Si l'on mène des courbes normales en chacun de leurs points aux méridiens magnétiques vrais, on obtient les *parallèles magnétiques* de Duperrey. On en voit quelques-uns dans la *fig.* 909.

Pôles magnétiques. — M. Hansteen avait conclu de la courbure des lignes

isogoniques dans les régions polaires, qu'il y avait dans chaque hémisphère deux points où elles convergeaient. Ces points, qu'il désignait sous le nom de *pôles magnétiques*, auraient été animés d'un mouvement très lent de rotation, les uns de l'est à l'ouest, les autres en sens inverse. M. Barlow a montré qu'il n'y a réellement que deux pôles magnétiques. Celui de l'hémisphère boréal se distingue facilement dans la *fig.* 908, au nord de la baie d'Hudson. Ces pôles, qui servent aussi de points de convergence aux méridiens magnétiques vrais de Duperrey, se distinguent dans la *fig.* 909; on voit que les parallèles magnétiques se resserrent de plus en plus, de façon à les désigner d'une autre manière. Celui de l'hémisphère nord est à 79°,11′ de latitude, et 78°,20′ de longitude orientale, et l'autre à 79°,11′ de latitude et 101°,40′ de longitude occidentale. Les inflexions prononcées des méridiens magnétiques vrais prés des pôles, expliquent pourquoi la déclinaison varie si rapidement dans les régions polaires, quand on se déplace suivant un parallèle géographique, comme le montre l'observation.

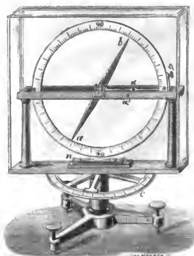


Fig. 910.

III. De l'inclinaison.

1229. BOUSSOLE D'INCLINAISON. — La *boussole d'inclinaison*, dont on se sert pour mesurer l'inclinaison, a reçu successivement de nombreux perfectionnements, dont les plus importants sont dûs à D. Bernoulli; la *fig.* 910 la représente telle qu'on l'emploie aujourd'hui. L'aiguille aimantée *ab* porte un axe transversal en acier passant par son centre de gravité, et parfaitement cylindrique. Cet axe roule sur la tranche de deux lames parallèles en agate, portées par deux traverses horizontales dirigées suivant le diamètre d'un cercle vertical. Ce cercle, divisé en degrés, est fixé aux traverses horizontales, soutenues elles-mêmes par deux colonnes. Une cage de verre enveloppe cette partie de l'appareil, qui peut tourner autour d'un axe vertical porté par le pied de l'instrument, de quantités angulaires mesurées par un vernier sur le cercle fixe *c*. Le niveau *n* sert à reconnaître si ce cercle est horizontal.

La partie la plus délicate de l'instrument est la suspension de l'aiguille; la *fig.* 911 en donne le détail : *ab* est l'aiguille, dont *r*, *r* sont des coupes

transversales; o, o, o' sont les plans d'agate sur lesquels roule son axe. On amène cet axe au centre du cercle vertical, au moyen de deux petits leviers dont les points d'appui sont en $\alpha\alpha$ (*fig.* 910), et que l'on voit en α, α, α' (*fig.* 911); ces leviers portent des fourchettes f, f, que l'on fait monter en abaissant le bouton β (*fig.* 910), de manière à soulever l'axe de l'aiguille quand on ne se sert pas de l'instrument. Quand on élève le bouton β, les fourchettes déposent l'axe sur les plans d'agate, au centre du cercle vertical.



Fig. 911.

Pour observer l'inclinaison, on commence par placer le cercle vertical dans le méridien magnétique, soit en cherchant la position pour laquelle l'aiguille fait le plus petit angle avec l'horizon, soit en cherchant celle pour laquelle elle est verticale; après quoi l'on fait marcher le vernier de 90° (1207). Il vaut mieux, du reste, faire deux opérations dans deux plans perpendiculaires entre eux, suivant la méthode indiquée plus haut (1207).

Indépendamment du défaut de régularité dans l'aimantation, dont on évite l'influence par la méthode de retournement (1234), il y a ici à considérer que le centre de gravité peut ne pas se trouver exactement sur l'axe de rotation de l'aiguille. Pour éviter cette cause d'erreur, on répète l'opération dans la même position du cercle vertical, mais après avoir aimanté l'aiguille en sens inverse, de manière que l'extrémité qui s'inclinait vers la terre se trouve en haut; et l'on prend la moyenne entre les angles obtenus dans les deux états d'aimantation. On fait donc quatre observations, dont on prend la moyenne. Du reste, les erreurs de lecture à chacune des extrémités de l'aiguille pouvant aller jusqu'à 20′, chaque opération partielle doit être répétée plusieurs fois, et en plaçant le cercle vertical successivement dans des positions différant de 180°.

1240. Détermination de l'inclinaison par la méthode des oscillations. — On peut encore obtenir l'inclinaison par une méthode indirecte imaginée par Laplace, et susceptible d'une grande exactitude. Elle consiste à observer le nombre d'oscillations que fait l'aiguille d'inclinaison pendant un certain temps, dans le méridien magnétique, puis dans un plan perpendiculaire à ce méridien. Soit n et n' ces nombres d'oscillations, et f et f' les forces qui les produisent; on aura (1210) $n^2 : n'^2 = f : f'$. Or, f n'est autre chose que la force magnétique du globe, et f' en est la composante verticale; on a donc, en appelant I l'angle d'inclinaison, $f' = f \sin \mathrm{I}$; et en combinant cette égalité avec l'égalité précédente, $\sin \mathrm{I} = n'^2 : n^2$.

1241. INCLINAISON AUX DIFFÉRENTS POINTS DE LA SURFACE DU GLOBE. — Nous avons déjà vu que l'inclinaison change avec la latitude (1203). Relativement à ce terme, il y a à considérer la *ligne sans inclinaison* ou *équateur magnéti-*

que, et les lignes sur lesquelles l'inclinaison est partout la même; ces lignes se nomment *lignes isocliniques* ou *isoclines*.

Equateur magnétique. — La forme de l'équateur magnétique a surtout occupé les savants et les voyageurs. La première figure de cette ligne a été donnée par Wilcke, en 1768, puis reproduite avec modifications par Lemonnier. On pensa d'abord que l'équateur magnétique était un grand cercle coupant la ligne équinoxiale en deux points ou *nœuds*, situés sur un même diamètre, et faisant avec le plan de ce dernier cercle un angle de 12° environ. En effet, en cherchant la direction de l'équateur magnétique considéré comme plan, au moyen de deux de ses points pris dans un intervalle de 180 degrés de longitude dans l'Atlantique, la mer des Indes et une partie de la mer du Sud, on trouvait toujours le même angle avec l'équateur géographique, et les mêmes nœuds. Les observations sur lesquelles on s'appuyait avaient été recueillies par Lacaille, W. Bayly, La Peyrouse, de Humboldt; l'un des nœuds se trouvait dans la mer du Sud, par 115° 34′ de longitude occidentale, près de l'île de Gallego, l'autre dans la mer des Indes, par 295° 34′ de longitude occidentale. Mais M. Biot [1], en discutant les observations de W. Bayly et de Kook, faites en 1777, entre 115° et 270° de longitude, reconnut que l'hypothèse d'un grand cercle ne s'accordait plus avec les faits. Ainsi ces navigateurs trouvèrent la ligne sans inclinaison, à 3° 36′ au sud de l'équateur, à l'ouest du nœud de l'île de Gallego, où elle aurait dû être au nord. Cette ligne repasse donc dans l'hémisphère sud, après s'être un peu élevée vers le nord dans un espace assez petit. Il faut donc qu'il y ait quatre nœuds, dont deux très rapprochés l'un de l'autre. M. Hansteen a aussi donné une figure de l'équateur magnétique. M. Morlet [2], en partant des données fournies par Kook, Eckberg, Panton, La Pérouse, etc., trouve qu'il n'y a que trois nœuds, l'équateur magnétique ne faisant que toucher la ligne équinoxiale à 120° de longitude occidentale, tandis que M. Hansteen admet que l'équateur magnétique passe dans l'hémisphère nord, pendant 15°, en remontant jusqu'à 1° 30′ de latitude, et redescend dans l'hémisphère sud, à 23° de la côte occidentale de l'Amérique.

Dans la *fig*. 908, la ligne sans inclinaison est représentée en ligne ponctuée, telle que Duperrey l'a tracée en 1825, après l'avoir coupée six fois dans ses voyages [3]; on voit qu'il n'y a que deux nœuds. La ligne pleine qui court dans le voisinage, est une courbe normale en chacun de ses points aux méridiens magnétiques vrais, à laquelle Duperrey donne le nom d'*équateur magnétique*, réservant à l'autre le nom de *ligne sans inclinaison*. Il fait remarquer que les points où cette dernière ligne s'écarte le plus de l'équateur géographique sont ceux où elle rencontre des terres; dans le Grand-Océan, ces deux lignes sont sensiblement parallèles, et peu éloignées l'une de l'autre.

[1] *Traité de physique expérimentale et mathématique*, t. III.

[2] *Mémoires des savants étrangers*, t. III.

[3] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXX, p. 337 et XLV, p. 371.

Pour déterminer les points de la ligne sans inclinaison qui n'ont pas été rencontrés dans les voyages, Morlet et Duperrey se sont servis d'une formule trouvée par M. Biot en partant de l'existence de deux centres magnétiques semblables à ceux des aimants, qui existeraient dans l'intérieur du globe à une petite distance du centre. Cette formule, transformée par MM. Boldwich, Malweid et Kraft, et que nous démontrerons plus loin (1257), se présente sous la forme très simple,

$$\text{tang } I = 2 \text{ tang } \lambda.$$

Elle exprime que la tangente de l'inclinaison est égale au double de la tangente de la *latitude magnétique* λ, c'est-à-dire de la latitude comptée à partir de la *ligne sans inclinaison*. Au moyen de cette formule, on déduit la valeur de λ de celle de I. M. Morlet a reconnu qu'elle est exacte quand on ne dépasse pas 25 à 30° de latitude ; car, si l'on observe l'inclinaison en différents points d'un même méridien géographique, pour en déduire la position du point où l'équateur magnétique rencontre ce méridien, on trouve toujours le même résultat. Mais, si l'on dépasse ces limites, on trouve des points trop éloignés de l'équateur géographique.

La ligne sans inclinaison éprouve un déplacement très lent, dans lequel les nœuds marchent vers l'ouest. Ce mouvement, signalé d'abord par M. Morlet, mais avec réserve, a été confirmé depuis ; il explique les différences entre les positions des nœuds trouvées par divers observateurs à différentes époques. Les nœuds, qui sont sensiblement aux extrémités d'un même diamètre de la terre, se sont avancés de 10° au moins, de 1780 à 1836, c'est-à-dire moyennement, de 0°,18 par année.

1242. Lignes isoclines. — Les *lignes isoclines* ou *isocliniques* correspondent à des inclinaisons d'autant plus grandes qu'on s'éloigne davantage de l'équateur magnétique. Wilcke, en 1768, en a donné une carte, modifiée plus tard par Lemonnier. M. Hansteen, en 1819, avait conclu de la figure de ces lignes, l'existence de quatre pôles magnétiques (1238), hypothèse que M. Barlow, puis M. Duperrey, ont fait abandonner. Ross a rencontré, en 1832, sur la terre de Boothia-Felix, le point où l'aiguille d'inclinaison est verticale, c'est-à-dire le pôle magnétique nord. Ce qu'il y a de très remarquable, c'est que ce point coïncide sensiblement avec le pôle magnétique déterminé par M. Duperrey au moyen des lignes isogoniques (1238).

De Humboldt a observé l'inclinaison dans l'Océan Atlantique, la mer du Sud, l'Europe, l'Amérique ; ces observations sont comprises dans une zone allant de 48° 50′ de latitude nord, à 12° de latitude sud. Gay-Lussac l'a observée dans différentes parties de l'Europe, dans l'Oural, l'Altaï, la mer Caspienne ; MM. Gauss, J. Franklin, Forbes, Duperrey et Parry, dans les hautes latitudes. Voici les principaux résultats auxquels on est arrivé. Dans les parties du globe où l'équateur magnétique est à peu près circulaire, c'est-à-dire dans l'Europe, l'Afrique, l'Océan Atlantique et les côtes orientales de l'Amérique,

l'inclinaison est sensiblement la même de part et d'autre et à égale distance de cette ligne. Mais au nord et au sud des régions où l'équateur magnétique présente des inflexions, les lignes isoclines en présentent aussi, et leurs irrégularités sont d'autant plus prononcées qu'on s'avance davantage vers les pôles. M. Duperrey a fait remarquer que ces lignes expriment deux faits à la fois ; car l'inclinaison est rapportée à l'horizon du lieu, et cet horizon n'est pas également incliné sur l'axe du globe, aux divers points d'une même courbe, ces points n'ayant pas même latitude. Cette remarque, qui s'applique à l'équateur magnétique, a fait généralement renoncer aux lignes isoclines.

De Humboldt [1] a imaginé de tirer parti de l'augmentation de l'inclinaison quand on s'avance vers les pôles, pour déterminer la latitude, près des côtes du Chili et du Pérou, où règnent, pendant une partie de l'année, des brouillards qui empêchent d'observer les astres. Il suffit de mesurer l'angle d'inclinaison, et de consulter une table où l'on trouve la latitude qui correspond à cet angle. Cette méthode est d'autant plus utile dans ces parages, que le courant du sud au nord (II, 1132) rendrait difficile le retour vers le sud, d'un navire qui aurait dépassé le port. Pour que cette méthode donne des résultats suffisamment approchés, il faut que le navire coupe les lignes isoclines dans une direction à peu près normale. Gilbert avait déjà conseillé de déterminer la latitude, au moyen de l'aiguille d'inclinaison : mais comme on croyait alors que les lignes isoclines se confondaient avec les parallèles géographiques, on pensait à tort que cette méthode pouvait s'appliquer partout, tandis qu'elle n'est praticable que dans certaines localités.

Les lignes isocliniques éprouvent, comme l'équateur magnétique, des changements de forme excessivement lents et peu prononcés.

IV. De l'intensité du magnétisme aux différents points de la surface du globe.

1243. Nous avons vu (1210) comment on peut, avec une même aiguille aimantée, comparer les intensités du magnétisme terrestre en différents pays, et nous avons décrit l'instrument qui sert à observer les oscillations de l'aiguille horizontale. Nous n'avons rien à ajouter à ce que nous avons dit à cet égard, si ce n'est qu'il ne faut pas oublier de ramener tous les résultats à une même température (1229). Malheureusement c'est ce qui n'a pas été fait par un certain nombre d'observateurs, ce qui augmente les incertitudes déjà si nombreuses dans ces sortes de recherches.

L'intensité magnétique augmente avec la latitude. — C'est à l'Académie des sciences de Paris qu'est due la première idée de comparer les intensités magnétiques des différentes régions du globe : dans les instructions rédigées pour le voyage de La Pérouse, elle recommanda d'observer les

[1] *Journal de physique*, 1804, t. LIX, p. 449

oscillations de l'aiguille aimantée, et Paul de Lamanon, qui faisait partie de l'expédition, reconnut que l'*intensité magnétique augmente avec la latitude*, résultat qui fut publié en 1787. Rossel, qui accompagnait d'Entrecasteaux dans son voyage à la recherche de La Pérouse, mit à profit les mêmes instructions, et constata, sans néanmoins formuler de loi, la variation de l'intensité magnétique d'un lieu à un autre. De Humboldt, avant que ces résultats n'eussent été rendus publics, découvrit de son côté la loi de l'accroissement d'intensité avec la latitude, lors de son voyage dans les régions équinoxiales de l'Amérique, en 1798, et leva les doutes qui existaient sur ce sujet. Il remarqua une valeur minimum sur l'équateur magnétique, dans le Pérou septentrional; valeur qu'on s'est accordé généralement depuis à prendre pour unité ; et c'est ce qu'on a fait pour calculer les nombres du tableau suivant :

LIEUX d'observation.	ANNÉES	LATITUDES.	INTENSITÉ magnétique.	LIEUX d'observation.	ANNÉES	LATITUDES.	INTENSITÉ magnétique.
Saint-Antoine..	1802	0°,0'	1,087	Bruxelles. . . .	1829	50°,52' N	1,374
Carthagène. . .	1801	10,25 N	1,294	Berlin..	1829	52,51	1,366
New-York....	1822	40,43	1,803	Christiana.. . .	1820	59,55	1,419
Naples.	1805	40,50	1,274	Pétersbourg.. .	1828	59,06	1,410
Lyon.	1805	45,46	1,333	Baie de Baffin.	1518	62,43	1,590
Paris.	1800	48,52	1,348	Spitzberg.. . .	1523	79,10	1,567

M. Ed. Sabine, de 1818 à 1820, a étudié l'intensité dans les régions polaires, et depuis, une foule de savants, qu'il serait trop long de nommer, ont fait de même dans toutes les parties du monde. Il résulte de l'ensemble de toutes les observations, que l'intensité augmente le plus rapidement dans l'hémisphère boréal. D'après M. Sabine, elle est égale à 1,624 au pôle magnétique nord près des îles Melville, c'est-à-dire moindre qu'à New-York, où elle est 1,803, tandis qu'au pôle magnétique austral, situé sur la terre Victoria, près du volcan Erebus, Ross l'a trouvée égale à 2,052. Le minimum d'intensité, 0,706, a été observé par A. Erman, à 19° 59′ de latitude sud, et à 10° 2′ de longitude est.

Lignes isodynamiques. — On nomme ainsi des lignes qui passent par les points de la surface du globe où l'intensité magnétique est la même. De Humboldt a tracé quelques lignes isodynamiques dans l'Amérique équinoxiale. En 1826, M. Hansteen a publié pour l'hémisphère nord, une carte de ces lignes. Elles diffèrent notablement des lignes isoclines, et sont beaucoup plus irrégulières; elles peuvent même les couper à angle droit, comme cela a lieu au Pérou. M. Hansteen a remarqué aussi une ressemblance assez frappante

entre les lignes isodynamiques et les lignes *isothermes* (II, 1109), ressemblance confirmée depuis par MM. Brewster et Duperrey, et qui porte à penser que les intensités magnétiques dépendent de la chaleur. M. Hansteen a conclu aussi, de la configuration des lignes d'égale intensité, comme il l'avait déduit de ses lignes isogoniques (1238), qu'il existe deux pôles magnétiques au nord. Mais M. Duperrey, qui a publié aussi des cartes des lignes isodynamiques pour les deux hémisphères, dans lesquelles il est parvenu à en tracer neuf, n'a trouvé qu'un seul pôle. Les lignes se resserrent latéralement en approchant du pôle nord de la terre, à peu près comme le font les lignes isothermes, mais elles ne se divisent pas en deux courbes distinctes, et le pôle déterminé par l'intensité, est renfermé dans un espace très allongé allant de la nouvelle Sibérie aux grands lacs, dans l'Amérique du nord. Cependant, nous devons dire que quelques physiciens, entre autres M. Gauss, admettent qu'il y a dans chaque hémisphère deux points où l'intensité est un maximum. Ces points coïncideraient avec les *pôles du froid* (II, 1109), mais non avec les pôles magnétiques déterminés par la déclinaison et l'inclinaison.

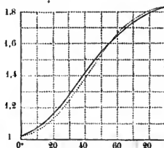


Fig. 912.

Parmi les lignes isodynamiques, il y a à considérer celle du minimum d'intensité. M. Duperrey a reconnu que cette courbe ne coïncide pas avec la ligne sans inclinaison, comme on l'a cru d'abord. Du reste, il n'a donné ses cartes qu'avec réserve, à cause des nombreuses incertitudes de ce genre d'observation, et aussi, des changements produits dans l'intensité même du globe en chaque lieu par les variations de température.

M. Biot, en partant de l'existence de deux centres magnétiques placés très près l'un de l'autre dans l'intérieur du globe, supposé homogène, a trouvé que les intensités i aux différentes latitudes, λ, sont données par la formule

$$i = \sqrt{1 + 3\sin^2\lambda},$$

Pour la vérifier, M. Duperrey a pris pour intensité aux différentes latitudes, la moyenne des intensités observées sur le parallèle géographique qui leur correspond, et il a trouvé des résultats sensiblement d'accord avec ceux que donne la formule de M. Biot. Ces derniers sont un peu plus faibles jusqu'à la latitude de 55° environ ; ils deviennent ensuite un peu plus forts. La différence est au plus de 0,015 de la valeur prise pour unité. Dans la *fig.* 912, les ordonnées de la ligne pleine représentent les intensités observées, et celles de la ligne ponctuée, les intensités que donne la formule aux latitudes représentées par les abcisses.

1244. Intensités dans les hautes régions de l'atmosphère. — Il résulte des observations de de Humboldt dans les Andes, et de M. Kupffer dans le Caucase, que l'intensité magnétique diminue à mesure qu'on s'élève au-dessus du niveau de la mer. Cependant, MM. Biot et Gay-Lussac, dans leur voyage aérostatique, n'ont pas trouvé de diminution sensible dans la durée de l'oscillation de l'aiguille aimantée; mais comme la température était très basse dans les hautes régions, et que la correction n'a pas été faite, ce résultat négatif confirme la diminution d'intensité à mesure qu'on s'élève.

V. Variations de l'aiguille aimantée en un même lieu.

1245. Méthodes d'observation. — Les directions et l'intensité de la force magnétique du globe éprouvent, en un même lieu, divers changements. Elles sont soumises à des variations *séculaires*, *annuelles* et *diurnes*, et à des *perturbations*, qui sont étudiées dans les observatoires avec un soin tout particulier; nous allons d'abord décrire les appareils avec lesquels on les observe.

Boussole des variations. — Pour observer les très petits changements de la déclinaison, tels que les variations diurnes, les perturbations, on s'est servi d'abord de la *boussole des variations*, instrument doué d'une sensibilité extrême, dont la *fig.* 913 représente un modèle construit par Gambay, d'après les idées de Coulomb. Dans la boîte BB' fixée sur une table de marbre, oscille un barreau aimanté suspendu par des fils de soie sans torsion. Ces fils traversent le châssis vitré V, et viennent s'enrouler sur un petit treuil *r*. Les extrémités de l'aimant, dont on voit une partie en *oa*, portent une petite plaque d'ivoire *a* sur laquelle sont gravés des quarts de millimètres et un repère. On observe les plaques d'ivoire, à travers des glaces *c c'*, au moyen de microscopes à réticule *mm'*. Chacun d'eux glisse dans une coulisse soutenue par deux colonnes, quand on fait tourner les vis de rappel *v*, *v'*. Des verniers dont les loupes *l*, *l'*, facilitent la lecture, glissent le long de divisions en millimètres. On place d'abord l'axe de la boîte dans le méridien magnétique, et l'on amène les microscopes au-dessus des repères. On observe ensuite les déplacements de l'aiguille, soit en comptant les divisions de la plaque d'ivoire, qui passent sous le réticule du microscope, soit en suivant,

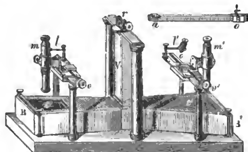


Fig. 913.

avec ce dernier qu'on peut faire marcher avec la vis de rappel, le repère, dont on évalue le déplacement au moyen du vernier.

Lunette magnétique de De Prony. — De Prony a employé, pour mesurer les plus petits changements de déclinaison, une longue aiguille aimantée suspendue par des fils de soie plate, et portant une lunette placée dans le sens de sa longueur, et avec laquelle on vise une échelle éloignée. Les plus petits déplacements de l'axe de la lunette, et, par suite, de celui de l'aiguille, deviennent sensibles. De Humboldt a fait un grand nombre d'observations avec cet appareil, qu'il regardait comme très précis.

1246. Observatoires magnétiques. — Pour observer les variations périodiques de l'aiguille aimantée, et surtout les perturbations, qui ne peuvent être prévues, on a établi des observatoires spéciaux, dans lesquels on fait des observations magnétiques d'une manière suivie. C'est à de Humboldt qu'est due la première idée des *observatoires magnétiques*. En considérant la perpétuelle mobilité du magnétisme terrestre, les variations de toutes sortes qui agitent continuellement l'aiguille aimantée, soit périodiquement, soit accidentellement, cet illustre physicien conçut l'idée d'observer l'aiguille aimantée pendant cinq ou six jours sans interruption ; ce qu'il fit à Berlin, en 1806 et en 1807, conjointement avec M. Oltmanns, au moyen de la lunette magnétique de De Prony. Il constata dès-lors l'existence de perturbations nombreuses.

De retour à Berlin, en 1828, il fit élever un petit observatoire magnétique, et institua des observations simultanées, à Berlin, à Paris et dans les mines de Freiberg, à 66^{m} de profondeur. En 1829, une expédition ordonnée par l'empereur de Russie fournit l'occasion d'établir des stations magnétiques sur une vaste échelle. Des observatoires furent en effet construits, sous la direction de M. Kupffer, dans toute l'Asie septentrionale, jusqu'à Pékin. En 1832, M. F. Gauss imagina les nouveaux appareils dont nous allons parler, et fonda l'*union magnétique*, dont Gœttingue est le centre, et d'où part le mot d'ordre pour les jours où l'on doit observer simultanément d'une manière continue. En 1836, l'Angleterre entra dans l'union, et en 1839 fut résolue l'expédition au pôle austral, commandée par Ross, et dans laquelle ont été faites des observations simultanées en huit ou dix stations différentes. Aujourd'hui, il existe des observatoires magnétiques dans toutes les parties du monde, en Russie, en Sibérie, à Pékin, à la Nouvelle-Hollande, à Van-Diemen. à Ceylan, au cap, à l'Ile de France, au Canada, à Sainte-Hélène, etc. Les observatoires anglais ont été choisis dans les positions les plus différentes, les uns près des pôles magnétiques, d'autres près de la ligne sans déclinaison. Voici la situation des plus importants.

	Latitude :	Longitude de Greenwich.	Déclinaison.	Inclinaison.
Toronto (Canada)	43° 39′ N.	79° 21′ O.	1° 27′ O.	+75° 15′ N.
Makerston (Écosse)	53 34	2 30	25 30	+71 16
Bombay	18 53	71 45 E.	»	»
Sainte-Hélène	15 36 S.	5 40	22 46	—21 37 S.
Le Cap	33 36	18 29	29 7	—53 58
Hobartown (Ile de Van-Diemen)	42 52	147 27	9 57	—70 37

Un observatoire magnétique consiste en une salle rectangulaire de 11ᵐ environ de longueur dans le sens du méridien magnétique, dans la construction de laquelle il n'entre pas de fer, et dont on éloigne à l'extérieur toute masse de fer un peu considérable. Sur le plancher est tracée une ligne dans le méridien magnétique et passant par le centre de la salle. A ce centre se trouve une base solidement fondée, destinée à recevoir un théodolite. Des croisées doubles empêchent le vent de se faire sentir en dedans.

1247. Appareils des observatoires. — M. Gauss a imaginé pour les observatoires, de nouveaux appareils d'une sensibilité extrême, au moyen desquels on peut suivre les plus petites variations du magnétisme terrestre. Ces appareils sont de trois espèces. Le premier, nommé *déclinomètre* ou *magnétomètre unifilaire*, est destiné principalement à mesurer la déclinaison absolue. Les deux autres servent particulièrement à faire connaître l'intensité de la force magnétique du globe, au moyen de ses deux composantes horizontale et verticale, évaluées séparément. La première est donnée par le *magnétomètre bifilaire*, la seconde par le *magnétomètre balance*.

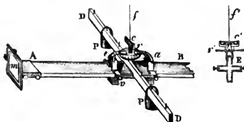


Fig. 914.

Déclinomètre. — Cet appareil consiste en un barreau aimanté AB (*fig.* 914), suspendu par un faisceau *f* de 200 fils de cocon parallèles et sans torsion. Ce faisceau s'enroule sur un petit treuil fixé au plafond, au-dessus de la trace du méridien magnétique, et à une distance du mur égale au quart à peu près de la longueur de la salle. L'aimant est porté par un étrier en laiton très mince *ea*, dont la coupe transversale qui se voit en E, est telle que l'aimant peut s'y placer de champ ou de face. L'étrier est fixé au barreau, au moyen de vis de pression *v*; il porte une espèce d'anse *era* qui repose sur un cercle divisé *r*, *r′*, soutenu par le fil de suspension *f*. Un pivot, qui traverse l'anse, à frottement, porte un double crochet *c*, *c′*, qui retient une goupille horizontale à laquelle est attaché le fil de suspension. Enfin, tout le système

oscillant est renfermé dans une boîte cylindrique portant une ouverture du côté du théodolite. Au moyen du disque r, r', on peut détruire la torsion du fil s'il en possède une ; le frottement fait ensuite rester le disque dans la position où on l'a mis. L'aimant porte un barreau en bois DD, auquel on suspend sur des pointes et à des distances variables, des poids de 500 grammes, P, P, pour augmenter le moment d'inertie du système oscillant.

Pour observer les plus petits déplacements de l'aimant, on emploie la méthode du miroir, que nous avons décrite à propos de l'élasticité de flexion, en se servant d'un théodolite (I, 435).

Le barreau aimanté n'est presque jamais en repos ; le moindre déplacement est accompagné d'oscillations, dont on ne peut attendre la fin, surtout si l'on veut observer des changements rapides dans la déclinaison. Pour obtenir la direction qu'aurait le barreau s'il n'oscillait pas, on observe deux positions extrêmes successives, pendant qu'il fait des oscillations très petites, et on prend la moyenne. Mais si la déclinaison varie, les deux écarts à droite et à gauche de la position d'équilibre ne sont pas égaux, et la moyenne donne un résultat inexact. Dans ce cas, si l'on désigne par T l'heure pour laquelle on veut avoir la déclinaison, et par t la durée d'une oscillation, on observera la position du barreau, aux instants $T-\frac{1}{2}t$ et $T+\frac{1}{2}t$, et on prendra la moyenne. Du reste, l'usage du déclinomètre exige de nombreuses précautions, dans le détail desquelles nous ne pouvons entrer ici [1].

Magnétomètre bifilaire. — Voici d'abord le principe de cet appareil, destiné spécialement à évaluer la composante horizontale de l'intensité magnétique du globe. Considérons une barre horizontale suspendue par deux fils d'égale longueur verticaux et parallèles, et fixés à des distances égales du centre de gravité de la barre. Cette barre reste en équilibre quand les fils sont parallèles ; mais si l'on vient à la déplacer horizontalement, les fils deviennent obliques, la barre est soulevée, et tend par conséquent à reprendre sa position d'équilibre. L'effort qu'il faut faire pour tenir la barre écartée de sa position d'équilibre, se nomme *force de direction*. On démontre que cette force est en raison inverse de la longueur des fils, et proportionnelle 1° au sinus de l'angle d'écart, 2° à la distance des fils, 3° au poids de la barre.

Supposons maintenant que la barre soit remplacée par un aimant et que les fils soient dans le méridien magnétique. L'état d'équilibre dépendant du mode de suspension ne sera pas modifié, si l'aimant est dans le méridien magnétique, son pôle nord tourné vers le nord ; et si on l'en écarte, la force directrice de l'aimant s'ajoutera à celle des fils, pour l'y ramener. Si le pôle nord est tourné vers le sud, il y aura encore équilibre stable, quand la force directrice de l'aimant sera moindre que celle du système de suspension. Mais ce ne sera plus que la différence de ces forces qui agira pour ramener le système à sa position d'équilibre. Enfin, si l'aimant est placé obliquement au plan des fils

[1] Voyez *Traité de l'électricité et du magnétisme*, par M. Becquerel, t. VII, p. 45.

parallèles, l'équilibre n'aura lieu que lorsque l'aimant fera un certain angle avec le méridien magnétique, angle qui dépendra de la force directrice, et qui, par conséquent, variera avec l'intensité du magnétisme terrestre. M. Gauss fait en sorte que l'aimant soit à peu près perpendiculaire au méridien magnétique, afin que l'action du magnétisme terrestre soit plus efficace.

Voici comment est disposé l'appareil : l'aimant, qui pèse 12 kil. $\frac{1}{2}$, est placé dans un étrier analogue à celui du déclinomètre (*fig.* 914) ; seulement le crochet c est remplacé par une bande en cuivre portant deux petits treuils, autour desquels s'enroulent les fils métalliques de suspension. L'angle du barreau avec le plan des fils, quand ils sont parallèles, se mesure au moyen d'un disque divisé, analogue au disque *r* (*fig.* 914). Entre les deux treuils est fixé un miroir vertical susceptible d'être orienté à volonté. Dans ce miroir vient se réfléchir une règle divisée placée au pied d'un théodolite. La moindre variation dans l'intensité de la composante horizontale fait changer la position de l'aimant, et l'appareil est tellement sensible qu'il permet d'apprécier $\frac{1}{22000}$ de cette intensité. Il faut avoir soin de tenir compte des changements de température.

Magnétomètre balance. — Cet instrument, imaginé par le Dr Lloyd, est destiné à apprécier les variations de la composante verticale du magnétisme terrestre. Un barreau aimanté *aa* (*fig.* 915) est fixé à l'extrémité d'un couteau *cc* reposant sur des plans d'agate, et que l'on peut soulever au moyen de la clef K, par l'intermédiaire de la fourchette *f*. L'aimant *aa* est rendu horizontal au moyen d'un contrepoids formé d'une petite masse, qui glisse sur une vis horizontale fixée au couteau du côté sud. Une autre vis verticale porte aussi une masse en forme d'écrou, au moyen de laquelle on peut faire varier la position du centre de gravité, que l'on amène sur l'axe magnétique de l'aimant. Ces deux vis ne se voient pas sur la figure. Le thermomètre *t* sert à compenser l'influence de la chaleur : quand la température s'élève, l'aimant s'affaiblit ; mais la colonne de mercure s'allongeant, elle fait avancer le centre de gravité du système, du côté du nord, de manière que l'aimant tend à s'incliner par un effet de la pesanteur, qui vient compenser la force magnétique perdue. Pour observer les changements de position de l'aimant, il y a à ses deux extrémités des anneaux en cuivre non représentés dans la figure, et portant des fils croisés que l'on observe au moyen de deux microscopes à réticule.

Dans les observatoires, on ne mesure pas directement les variations de l'inclinaison, à cause des incertitudes des méthodes, mais on les déduit des variations des intensités des composantes horizontales *h* et verticales *v* de la force terrestre, au moyen de la formule $\tang i = v : h$.

1248. Appareils enregistreurs. — Dans plusieurs observatoires, les appareils que nous venons de décrire sont disposés de manière à enregistrer leurs propres indications, au moyen de la photographie, d'après le système de M. Broocke (I, 390). — Prenons pour exemple le magnétomètre balance. Au couteau *cc* (*fig.* 915 et 916) est fixé un miroir sphérique concave *m*, en avant

duquel se trouve un bec de gaz r entouré d'une cheminée opaque, qui laisse passer par une fente un faisceau de rayons lumineux; le faisceau forme, au-delà du bec de gaz, un foyer f, qui tombe sur une feuille de papier photo-

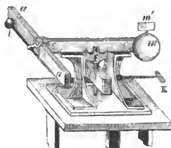


Fig. 915.

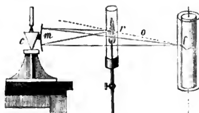


Fig. 916.

graphique appliquée sur un cylindre de verre que fait tourner un mouvement d'horlogerie. Un second cylindre en verre enveloppe le premier, pour conserver l'humidité du papier. Si le magnétomètre ne bouge pas, le foyer marque sur le papier une circonférence; mais si le miroir change de position, le foyer trace une courbe sinueuse. Les indications du *déclinomètre* s'enregistrent de la même manière, au moyen d'un petit miroir sphérique fixé à l'aimant au-dessous du point d'attache du fil de suspension; seulement le cylindre tournant est vertical.

1249. Variations séculaires de la déclinaison. — Les plus anciennes observations de déclinaison un peu précises, ont été faites en Angleterre en 1176, et à Paris en 1580. Voici le tableau des résultats trouvés dans cette dernière ville :

ANNÉES.	DÉCLINAISONS.	ANNÉES.	DÉCLINAISONS.	ANNÉES.	DÉCLINAISONS.
1580	11°,30′ Est.	1813	22°,28′	1825	22°,22′
1618	8,0	1814	22,34 maxim.	1827	22,20
1663	0	1816	22,25	1828	22,6
1678	1,30 Ouest.	1817	22,19	1829	22,12
1700	8,10	1818	22,22	1832	22,3
1767	19,16	1819	22,29	1835	22,4
1780	19,25	1822	22,11	1849	20,34
1785	22,0	1823	22,23	1850	20,31
1805	22.5	1824	22,23	1851	20,25

Ces résultats sont les moyennes de ceux que l'on obtient pour chaque jour, puis pour chaque mois de l'année, afin de faire disparaître les variations mensuelles et diurnes. On voit que la déclinaison, d'abord orientale, a diminué jusqu'en 1663, époque où elle a été nulle ; elle est devenue ensuite occidentale, a augmenté jusqu'en 1814, et depuis cette époque elle va en diminuant. Aujourd'hui, la diminution est à peu prés de 10′ par année. A Londres, la déclinaison était de 11° 15′ en 1576 ; elle a été trouvée nulle depuis 1657 jusqu'en 1662 ; elle est devenue occidentale et a atteint son maximum, 24° 36′, en 1800. En 1831, elle n'était plus que de 24°. Comme exemple des variations séculaires dans l'hémisphère austral, nous citerons les observations faites au Cap de Bonne-Espérance à partir de 1605. Alors la déclinaison était de 0° 30′ est ; elle est devenue nulle entre 1605 et 1609, puis occidentale, et a atteint son maximum, 25° 40′, vers 1791. De ces variations séculaires résultent les déplacements des lignes isogoniques.

1250. Variations annuelles. — La déclinaison éprouve, chaque année, des variations périodiques, qui ont été découvertes en 1786 par Cassini ; elles semblent dépendre de la position du soleil de part et d'autre de l'équateur. Les changements de température de l'aiguille ne paraissent pas cependant en être la cause ; car Cassini a reconnu que les mouvements de l'aiguille avaient lieu de la même manière dans les caves de l'observatoire de Paris, où la température est fixe, et où la lumière ne pénètre pas. Voici quels sont ces mouvements [1] ; pendant les mois d'avril, mai, juin, juillet, compris entre l'équinoxe du printemps et le solstice d'été, l'extrémité nord de l'aiguille rétrograde vers l'est ; pendant les neuf mois suivants, la marche générale est vers l'ouest. Pour établir cette loi, on prend la moyenne des déclinaisons *maximum* et *minimum* de chaque jour, d'où l'on déduit les moyennes mensuelles que l'on doit comparer. Le mouvement annuel est limité dans une amplitude de 15′ à 18′. Il a été observé à Londres, en 1800, par M. Gilpin, qui a trouvé un *maximum* de déclinaison vers l'équinoxe de printemps, et un minimum aux solstices d'été ; seulement, l'amplitude est beaucoup plus petite qu'à Paris. M. Beaufoy, de 1818 à 1820, a trouvé la variation mensuelle à peu prés nulle. Or, à cette époque, la variation séculaire était aussi à peu près nulle, parce qu'on était près de l'époque du maximum. En 1800, la variation séculaire était plus petite qu'en 1786, époque à laquelle observait Cassini ; d'où Arago a conclu que l'amplitude des variations annuelles croît et diminue en même temps que l'étendue du mouvement séculaire.

1251. Variations diurnes de la déclinaison. — Les variations diurnes ont été découvertes en 1722 par Graham ; depuis, elles ont été étudiées avec soin, dans l'espoir d'en trouver la cause. En Europe, l'extrémité nord de l'aiguille aimantée marche vers l'ouest à partir du lever du soleil, jusqu'à une

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XVI, p. 54.

heure ou deux après midi, puis elle revient sur ses pas, et reprend sa première position vers 10 heures du soir. On voit que la déviation vers l'ouest est la plus grande aux heures où la température est la plus élevée. L'amplitude de ces mouvements est très petite, et différente d'un jour à l'autre ; tantôt elle atteint 20′ à 25′, tantôt elle ne dépasse pas 5 ou 6′.

L'aiguille aimantée dont on se sert a une influence sensible sur les résultats obtenus aux différentes heures : M. Lottin ayant comparé, à Paris, la marche de la boussole des variations de la corvette *la Recherche*, avec celle de la boussole de l'Observatoire, vit que les courbes par lesquelles les résultats furent représentés graphiquement offraient bien la même forme générale, mais qu'elles étaient loin d'être identiques.

Variations diurnes en différents pays. — L'amplitude des variations est d'autant plus petite qu'on se rapproche davantage de l'équateur magnétique. Ainsi, dans l'île de Rawak, la déviation n'est que de 3′ ou 4′ au plus. Les courbes de la *fig.* 917 donnent une idée des amplitudes des variations diurnes à Hobartown, HH ; Toronto, TT ; le Cap, CC, et Sainte-Hélène, SS.

1252. Lois générales des variations périodiques de la déclinaison. — Le P. A. Secchi, en comparant les nombreux résultats recueillis dans les observatoires magnétiques, principalement dans ceux des Anglais et des Russes, coordonnés et publiés, les premiers par M. Sabine, et les autres par M. Kupffer, est arrivé à formuler les lois importantes qui suivent [1] :

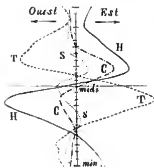


Fig. 917.

I. *Les variations diurnes de la déclinaison suivent en chaque lieu le temps local* ; elles sont donc en rapport avec la position du soleil, comme on l'avait déjà constaté pour l'Europe.

II. Le pôle de l'aiguille qui est tourné du côté du parallèle que décrit le soleil, fait chaque jour une double excursion : 4 à 5 heures avant midi, ce pôle est au maximum de distance du méridien magnétique vers l'ouest; de là il marche vers l'est avec une vitesse croissante, qui atteint son maximum à peu près au moment où le soleil passe par le méridien magnétique. Une ou deux heures après, l'aiguille s'arrête pour revenir sur ses pas jusqu'au coucher du soleil. — Pendant la nuit, quand le soleil passe au méridien inférieur, la même oscillation se répète, mais avec une moindre amplitude. — Les heures limites changent avec les saisons ; elles avancent généralement en été et retardent en hiver. — Les amplitudes sont à

[1] *Il nuovo cimento*, t. I, p. 60, et *Ann. de ch. et ph.*, 3e série XLIV, 246.

à peu près proportionnelles aux arcs parcourus par le soleil le jour et la nuit. — On voit dans la *fig.* 917 les courbes qui représentent les moyennes variations diurnes à Hobartown, HH; Toronto, TT; le Cap, CC, et Sainte-Hélène, SS.

Il résulte de cette seconde loi que 1° les mouvements de l'un des pôles dans un hémisphère sont les mêmes que ceux de l'autre pôle dans l'hémisphère opposé; ou bien que le pôle nord de l'aiguille prend des mouvements inverses aux mêmes heures et sur le même méridien dans les deux hémisphères, comme on peut le voir sur les courbes T et H (*fig.* 917). Magdonald avait déjà remarqué ce fait, et Arago en avait conclu qu'il doit y avoir une ligne sans variations diurnes, dans le voisinage de l'équateur. Cette ligne n'a pas été déterminée, on sait seulement qu'elle ne se confond ni avec l'équateur géographique, ni avec l'équateur magnétique. — 2° Les heures limites dépendant de la position du méridien magnétique, on voit qu'elles seront différentes en deux lieux où la déclinaison est différente; — elles dépendront aussi de la déclinaison du soleil, et varieront par conséquent aux différentes époques de l'année.

III. Les variations diverses de l'aiguille sont le résultat de la superposition de deux variations distinctes, l'une dépendant de la position horaire du soleil, l'autre dépendant de sa déclinaison ou distance à l'équateur, et formant la variation annuelle.

On reconnaît l'influence de la déclinaison, en construisant la courbe pour deux déclinaisons opposées du soleil. La *fig.* 918 représente les courbes moyennes des variations diurnes pendant l'été et pendant l'hiver à Sainte-Hélène. Les courbes sont opposées parce que le soleil passe d'un côté à l'autre du parallèle de cette île. Quand le lieu n'est pas entre les tropiques, il n'y a pas opposition dans les résultats, mais seulement changement dans l'amplitude. Par exemple, la courbe moyenne à Toronto étant *m* (*fig.* 919), celle de l'été est E E et celle de l'hiver H H; le passage d'une de ces courbes à l'autre se fait très brusquement, au voisinage des équinoxes.

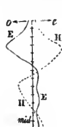


Fig. 918.

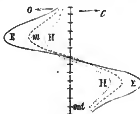


Fig. 919.

1253. VARIATIONS DE L'INCLINAISON. — L'inclinaison éprouve, comme la déclinaison, des variations séculaires, annuelles et diurnes; mais généralement beaucoup plus faibles.

Depuis l'année 1671 que l'on observe l'inclinaison à Paris, elle a constamment diminué, comme on le voit dans le tableau qui suit :

ANNÉES.	INCLINAISONS.	ANNÉES.	INCLINAISONS.	ANNÉES.	INCLINAISONS.
1671	75°,0'	1810	68°,50	1831	67°,41'
1754	72,15	1816	68,40	1834	67,21
1776	72,25	1818	68,35	1836	67,26
1780	71,48	1820	68,20	1839	67,13
1791	70,52	1822	68,11	1841	67,9
1798	69,51	1824	68,7	1849	66,44
1806	69,12	1826	68,0	1851	66,25

Il résulte des observations faites à Londres à partir de 1720, que l'inclinaison y va aussi en diminuant.

Des variations de l'inclinaison résultent les déplacements séculaires des lignes isoclines, ainsi que de l'équateur magnétique. Les changements de position de cette dernière ligne peuvent servir à calculer les variations de l'inclinaison en un même lieu, au moyen de la formule $2 \tang \lambda = \tang I$ (1241) ; la valeur de λ, pour un même lieu, varie quand l'équateur magnétique se déplace, il faut donc que I varie aussi, et l'on pourra en calculer la valeur par cette formule, en la supposant exacte pour la latitude considérée. Arago et De Humboldt ont trouvé ainsi, en partant du mouvement de l'équateur magnétique de 1778 à 1820, une diminution de 5′ par an dans l'inclinaison, et seulement de 3′, 5, pour les années comprises entre 1820 et 1855.

Variations périodiques de l'inclinaison. — Les *variations annuelles* de l'inclinaison ont été étudiées principalement par M. Hansteen. Il a reconnu, en prenant la moyenne d'un grand nombre d'observations, que l'inclinaison est de 15′ environ plus grande en été qu'en hiver. Enfin, le même observateur a pu distinguer des *variations diurnes :* il a trouvé que l'inclinaison est de 4 à 5′ plus grande avant midi qu'après.

En déduisant les *inclinaisons*, des intensités des composantes horizontale et verticale (1246), M. Secchi est arrivé à cette loi générale : les variations diurnes de l'*inclinaison* suivent des phases analogues à celles de la déclinaison, *mais avec une avance de trois heures.*

1254. VARIATIONS DE L'INTENSITÉ. — L'intensité magnétique du globe éprouve-t-elle, en un même lieu, des variations *séculaires ?* Pour s'en assurer, il faudrait faire osciller à différentes époques une même aiguille aimantée ayant toujours la même force magnétique : mais on sait combien il est difficile de

conserver intacte la force d'un aimant pendant un grand nombre d'années. On pourrait, il est vrai, employer plusieurs aiguilles très différentes, et celles qui, au bout de plusieurs années, auraient conservé les mêmes rapports entre leurs nombres d'oscillations, auraient aussi conservé leur état magnétique ; car il serait difficile de concevoir qu'elles eussent toutes été modifiées dans un même rapport avec leur intensité primitive.

Poisson a indiqué une méthode qui permet de déterminer l'intensité absolue du magnétisme de la terre, indépendamment de la force des aiguilles employées ; il faut seulement en avoir deux identiques dans leur constitution moléculaire et dans leur état d'aimantation. On fait osciller ces aiguilles sous l'influence de la terre seule, puis sous celle de la terre et de l'autre aiguille, en ayant soin de les placer parallèlement à l'aiguille d'inclinaison, et l'on mesure la durée d'une oscillation dans ces différents cas. Il faut aussi connaître la distance des centres de gravité des deux aiguilles, et leur moment d'inertie. La force magnétique de la terre est alors donnée par la formulo $F = kk' : k''$; k, k', k'' étant des quantités qui dépendent des durées des oscillations. M. Gauss a employé une méthode analogue, et il a reconnu que l'intensité magnétique du globe n'a pas varié à Gœttingue et dans quelques autres lieux, pendant plusieurs années ; mais l'intervalle de temps sur lequel portent les observations n'est pas assez grand pour qu'on puisse rien conclure. Il est peu probable, du reste, que la direction de la force magnétique change en un lieu, sans que l'intensité éprouve quelques variations.

Variations périodiques de l'intensité. — Dans les observatoires magnétiques, on étudie les variations des composantes *horizontale* et *verticale*. M. Secchi a déduit, du dépouillement d'un trés grand nombre d'observations, les lois générales suivantes :

I. Le magnétomètre bifilaire est soumis à une variation horaire qui est la résultante de deux variations élémentaires, l'une diurne et l'autre semi-diurne. L'amplitude de la variation d'intensité semi-diurne augmente avec la latitude, et est nulle à l'équateur. Les phases par lesquelles elle passe dépendent de la distance angulaire du soleil au méridien magnétique. — Dans les stations à latitudes moyennes, la courbe du *magnétomètre bifilaire* est semblable à celle du *déclinomètre*, mais avec un retard de 6 heures. La période semi-diurne est à peine indiquée à Sainte-Hélène ; elle est ensuite d'autant plus distincte que la latitude est plus élevée.

II. Les variations de la composante verticale suivent les mêmes périodes que celles de la composante horizontale, avec cette différence essentielle que les *maximum de l'une correspondent, en général, aux minimum de l'autre et réciproquement*.

Force totale. — Des composantes horizontales et verticales, on déduit les forces magnétiques totales ; mais les lois que suivent ces dernières sont peu connues, les observations n'étant pas assez nombreuses, surtout prés de l'équateur, et de plus les circonstances locales semblent avoir une très grande

influence. Cependant, on a remarqué une période semi-diurne à Toronto : le *maximum principal* a lieu à 5 heures, le *minimum principal* entre 15 et 16 heures, le 2e *maximum* entre 18 et 20 heures, et le 2e *minimum* entre 22 et 25 heures. Au Cap, les variations sont à peu près complémentaires de celles de la déclinaison.

M. Hansteen, qui avait remarqué dans la *composante horizontale*, un minimum vers 11 heures du matin, et un maximum vers 5 heures du soir, et des variations dans les intensités moyennes d'un mois à l'autre, le minimum ayant lieu en mai et juin, et le maximum vers les équinoxes, attribue ces résultats aux variations diurnes et mensuelles de l'inclinaison, d'où dépend la valeur de la composante; de sorte que l'intensité magnétique du globe n'éprouverait pas de variations diurnes et annuelles susceptibles d'être mesurées. Cette opinion est confirmée par cette circonstance que les variations des composantes horizontale et verticale ont lieu en sens inverse. On peut donner la même interprétation au résultat obtenu par M. Quételet, qui a trouvé que l'intensité de la composante horizontale a un peu augmenté de 1828 à 1833; c'est que l'inclinaison a diminué pendant ce même intervalle de temps.

1255. PERTURBATIONS DE L'AIGUILLE AIMANTÉE. — L'aiguille aimantée, particulièrement l'aiguille de déclinaison, éprouve assez souvent des déviations accidentelles, pour revenir au bout de quelques heures à sa première position. Les marins désignent ces anomalies sous le nom d'*affolements*. Parmi ces mouvements, il en est qui se rattachent à des causes connues, qui sont les aurores boréales, les tremblements de terre et les éruptions volcaniques. On n'a que peu d'observations sur les deux dernières causes, qui, du reste, ne se font sentir qu'à une petite distance. Dans tous les cas, l'aiguille n'est généralement déviée que d'une fraction de degré, et elle revient à sa position primitive quand cesse le phénomène qui l'a agitée.

Influence des aurores boréales. — La coïncidence entre la présence des aurores boréales et certains mouvements de l'aiguille aimantée, a été découverte en 1740 par Celsius et Hiorter. Nous décrirons plus tard l'aurore boréale; nous nous contenterons, pour le moment, de dire qu'elle consiste en une apparence lumineuse d'un éclat variable, qui se montre dans l'atmosphère, du côté du pôle. Le plus souvent, cette lumière affecte la forme d'un arc immense à contours diffus, et dont s'échappent des ramifications ou rayonnements lumineux animés de mouvements plus ou moins rapides. Pendant l'aurore boréale, l'aiguille de déclinaison est déviée, même dans les pays où le météore n'est pas visible; de manière qu'on a pu souvent, à l'inspection de l'aiguille, annoncer la présence d'une aurore boréale dont on ne voyait aucun signe. La déviation n'est que de 20′ au plus dans nos climats, mais elle est plus grande quand on se rapproche du pôle. C'est aussi dans les régions boréales qu'on a principalement étudié le phénomène. On a remarqué d'abord que le point culminant de l'arc se trouve dans le méridien magnétique de l'aiguille considérée, et le centre de la couronne, sur le prolongement de

l'aiguille d'inclinaison. L'aiguille reste assez tranquille quand l'arc lumineux est immobile; mais quand il darde des rayons, l'aiguille oscille, et quelquefois de plusieurs degrés. Ces effets sont, du reste, d'autant plus prononcés que l'éclat de l'aurore boréale est plus vif; quand elle ne présente qu'une lumière incertaine et diffuse, l'aiguille n'éprouve pas d'agitation ou n'en éprouve qu'une très petite. Cependant, généralement, la déclinaison augmente à l'avance, et prédit pour ainsi dire le phénomène; d'autres fois elle ne commence à changer que quelque temps après la formation de l'arc lumineux. Nous ajouterons enfin que l'inclinaison et l'intensité éprouvent aussi des variations irrégulières.

1256. Résultats généraux. — Les perturbations qui ne peuvent se rattacher aux causes précédentes, ne sont assez bien connues que depuis l'établissement des observatoires magnétiques, dans lesquels on observe d'une manière suivie l'aiguille aimantée; car ces perturbations ne peuvent être prévues, à cause de leur irrégularité même.

Les appareils à forts aimants ont d'abord mis en évidence ce résultat inaperçu avec les aiguilles faibles, que le magnétisme terrestre est dans un état continuel de fluctuation, comme les flots de la mer. C'est pourquoi quand on étudie les variations diurnes, annuelles et séculaires de la déclinaison, on a soin de calculer les moyennes d'un très grand nombre d'observations, pour faire disparaître ces anomalies et pouvoir distinguer les lois.

Un second fait très remarquable, consiste dans la simultanéité *fréquente* des perturbations, dans les pays les plus éloignés. Par exemple, Sabine cite un orage magnétique qui s'est fait sentir simultanément à Toronto, au Cap, à Prague et à Van-Diémen. Cette coïncidence des perturbations est telle, qu'on pourrait s'en servir pour déterminer la longitude des lieux d'observations. Arago, qui avait institué, dès 1820, des observations horaires à Paris, avait déjà reconnu ce fait, en les comparant à celles qui étaient faites en même temps à Kazan. De Humboldt et M. Oltmanns, lors de leurs observations de 1806, ont constaté l'existence de perturbations singulières, revenant parfois aux mêmes heures pendant plusieurs nuits de suite; on les désigne sous le nom d'*orages magnétiques*.

Il existe aussi des perturbations locales, qui ne s'étendent qu'à de petites distances. De Humboldt en cite une qui se manifesta dans les mines de Saxe, sans être sensible à Berlin. Des orages magnétiques observés simultanément depuis la Sicile jusqu'à Upsal, sont restés inaperçus d'Upsal à Altena.

Pour étudier ces phénomènes et rechercher quelle part il faut faire aux influences locales, MM. Gauss et de Humboldt ont fixé des époques auxquelles on suit la marche des appareils, d'une manière presque continue, dans les différents observatoires qui font partie de l'union magnétique. Aujourd'hui, on adopte six époques, ou *termes d'observations*, auxquelles on observe pendant 24 heures, de 3 minutes en 3^m. Un annuaire spécial, commencé par MM. Gauss et Weber, rend compte chaque année des résultats obtenus, en présente le

tracé graphique, et donne la description des appareils nouvellement installés, ou des modifications de détail qu'ils peuvent avoir reçues.

Parmi les résultats généraux qui découlent du dépouillement du nombre considérable d'observations déjà enregistrées, nous citerons les suivants : par les ouragans les plus intenses, l'aiguille aimantée reste dans un repos parfait, et les orages les plus violents l'agitent à peine. Les anomalies sont moins prononcées aux basses latitudes que vers le nord. Par exemple, le 30 juin 1836, il y a eu une anomalie remarquable qui a donné 6′ de déviation à Catane, 12′ à Milan, 13′,5 à Munich, 16′ à Leipzig, 20′ à Marbourg, 26′ à Gœttingue, et 29′ à La Haye.

M. Secchi a reconnu les lois suivantes : 1° les perturbations semblent suivre une période de 24 heures, celles du matin tendant à diminuer l'amplitude des variations diurnes de la déclinaison, et celles du soir tendant à l'augmenter ; 2° les perturbations paraissent en rapport avec le temps local, elles sont plus fréquentes vers 9 heures du soir et vers 7 heures du matin ; 3° comme les variations périodiques, elles ont lieu en sens inverse dans les deux hémisphères.

L'observation du magnétomètre bifilaire a aussi démontré à MM. Gauss et Weber que la composante horizontale du magnétisme terrestre éprouve des variations irrégulières d'intensité, qui ne le cèdent ni en étendue ni en fréquence aux variations de la déclinaison.

VI. Hypothèses par lesquelles on cherche à expliquer les lois du magnétisme terrestre.

1257. Nous avons déjà vu (1204) comment Gilbert, en regardant la terre comme un aimant, était parvenu à rendre compte, dans leur ensemble, des diverses actions exercées par le globe sur les aimants et sur le fer. Quand on eut étudié plus en détail la distribution irrégulière du magnétisme à la surface de la terre, on a cherché à se rendre compte des différentes lois déduites de l'observation, et particulièrement des variations de la déclinaison, d'un lieu à un autre. L'hypothèse la plus simple consiste à supposer dans l'intérieur du globe deux centres d'action magnétique a, a' (*fig.* 920), disposés de chaque côté du centre, et sur un diamètre mm' oblique à son axe de rotation ns. On voit qu'une aiguille aimantée placée sur le méridien nes, qui contient les deux axes mm', ns, se dirigera dans le plan de ce méridien, qui sera par conséquent une *ligne sans déclinaison*. Mais si l'aiguille est placée en un point D pris hors du méridien nes, elle se dirigera dans le plan mDm', et par consé-

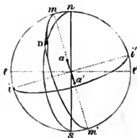


Fig. 920.

quent fera, avec le méridien *nDs* qui passe par le point D, un angle de *déclinaison* *mDn*. Les points *m*, *m'* où la ligne *aa'* rencontre la surface de la sphère, sont les *pôles magnétiques*. On voit, en effet, qu'en ces points l'aiguille devra se diriger suivant *mm'*, c'est-à-dire verticalement. Si nous menons le grand cercle *ii'* perpendiculaire a *aa'*, nous aurons l'*équateur magnétique*.

M. Biot, en partant de l'hypothèse qui précède, a trouvé les formules qui lient l'*inclinaison* et l'*intensité* à la latitude magnétique (1241 et 1243). Voici comment on peut trouver ces formules. Soient A et B (*fig.* 921) les centres magnétiques, *oe* l'équateur magnétique, et $\lambda = em$ la latitude magnétique d'un point *m*, dont les distances aux points A et B sont *a* et *b*, et enfin *l* la distance $Ao = oB$, distance très-petite par rapport au rayon *r* du globe, et dont nous négligerons les puissances devant celles de *r*. Si nous désignons par 1 l'action de chacun des centres A et B à l'unité de distance, sur l'un des pôles d'une aiguille aimantée, les actions exercées quand cette aiguille sera en *m*, seront $\frac{1}{b^2}$ et $-\frac{1}{a^2}$, la première attractive, et la seconde répulsive. En appelant V la somme des composantes verticales de ces forces, et H, la somme de leurs composantes horizontales suivant *mh*, l'inclinaison I et l'intensité *i*, seront données par les formules

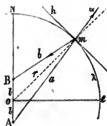


Fig. 921.

$$\tang I = V : H, \qquad i^2 = H^2 + V^2.$$

Cherchons donc les valeurs des composantes V et H.

Les forces $1 : b^2$ et $1 : a^2$ ont pour composantes horizontales :

[1] $$\frac{1}{b^2}\cos \overline{Bmh}, \; -\frac{1}{a^2}\cos \overline{\alpha mh}\,; \quad \text{et} \quad \frac{1}{b^2}\sin \overline{Bmh}, \; -\frac{1}{a^2}\sin \overline{\alpha mh},$$

pour composantes verticales. Il reste à évaluer les angles, et les distances *a* et *b*, en fonction de λ et de *r*.

Cherchons d'abord la distance $Am = a$. Le triangle *Amo* donne

$$a^2 = l^2 + r^2 - 2rl \cos \overline{Aom} = l^2 + r^2 + 2rl \cos \lambda,$$

en remplaçant *Aom* par $Aom - 90°$. En négligeant l^2 devant r^2, il vient

$$a^2 = r^2 + 2rl \sin \lambda; \quad \text{d'où} \quad \frac{1}{a^2} = \frac{1}{r^2 + 2rl \sin \lambda} = r^2 - 2rl \sin \lambda \qquad [2]$$

en faisant la division, et négligeant les termes qui contiennent les puissances de $l : r$. En changeant l en $-l$, on aura de même

$$b^2 = r^2 - 2rl \sin \lambda; \quad \text{et} \quad \frac{1}{b^2} = r^2 + 2rl \sin \lambda. \qquad [3]$$

formules que l'on peut aussi trouver directement.

Pour trouver la valeur de cos $\overline{Bmh}$ = sin omB, considérons le triangle omB ; ce triangle donne sin $\overline{om}$B : l = cos λ : b. Or, on a

$$b^2 = r^2 - 2lr \sin \lambda = (r - l \sin \lambda)^2 - l^2 \sin^2 \lambda \text{ ; ou } b = r - l \sin \lambda$$

en négligeant le terme qui contient l^2 ; on aura donc

$$\cos \overline{Bmh} = \sin \overline{om}B = \frac{l \cos \lambda}{b} = \frac{l \cos \lambda}{r - l \sin \lambda} = \frac{l}{r} \cos \lambda \qquad [4]$$

en effectuant la division, et négligeant les termes qui contiennent les puissances de $l : r$. On conclut de là en négligeant $l^2 : r^2$,

$$\sin \overline{Bmh} = \sqrt{1 - \cos^2 \overline{Bmh}} = \sqrt{1 - \frac{l^2}{r^2} \cos^2 \lambda} = 1 \qquad [5]$$

On trouve de même, en remplaçant l par $-l$

$$\cos \overline{amh} = -\frac{l}{r} \cos \lambda \qquad \text{et} \qquad \sin \overline{amh} = 1 \qquad [6]$$

Substituant les valeurs [2], [3], [4], [5], [6] dans les formules [1], et faisant les sommes des composantes horizontales et verticales, on aura pour ces sommes, H et V :

$$H = 2rl \cos \lambda, \qquad V = 4rl \sin \lambda, \quad \text{d'où}$$

$$\text{tang } I = \frac{V}{H} = 2 \text{ tang } \lambda, \; i^2 = H^2 + V^2 = 4r^2l^2 \cos^2 \lambda + 16r^2l^2 \sin^2 \lambda,$$

et $i = \sqrt{1 + 3 \sin^2 \lambda}$, en prenant pour unité l'intensité $4r^2l^2$ qui correspond à $\lambda = 0$. Nous avons vu jusqu'à quel point ces formules représentent les résultats de l'observation (1241 et 1243).

Irrégularités. — L'hypothèse d'un aimant intérieur rend compte de l'ensemble des phénomènes, mais elle n'explique pas les irrégularités nombreuses de la distribution du magnétisme à la surface de la terre. Ainsi, les méridiens magnétiques et les lignes sans déclinaison, les lignes isoclines, l'équateur magnétique et les lignes isodynamiques, devraient être des cercles, ce qui n'est pas. De plus, ces courbes se déplacent, les termes dont elles expriment la valeur éprouvant des variations séculaires. On est porté à attribuer les irrégularités de ces courbes au défaut d'homogénéité de l'aimant terrestre. Lahire a fait une expérience curieuse qui montre l'influence de cette cause : il fit tailler en forme

de sphère un aimant naturel pesant près de 100 livres. Il détermina son axe magnétique et reconnut qu'une petite aiguille aimantée portée aux différents points de sa surface, ne s'arrêtait pas, le plus souvent, dans le plan de l'axe, et s'en écartait d'un côté ou de l'autre, quelquefois de 26°.

Tobie Mayer, en 1760, supposa que l'axe des centres magnétiques *a, a'* ne passait pas par le centre du globe, mais se trouvait à une distance de ce point égale au septième du rayon. M. Hansteen suppose quatre centres formant deux aimants très courts et inégaux, qui lui servaient à rendre compte des quatre pôles magnétiques qu'il admettait à la surface du globe. M. Biot suppose, indépendamment des centres A, B, un troisième centre, sorte de point conséquent, situé au-dessous des archipels de la mer du sud, et beaucoup plus faible que les deux autres; et les résultats auxquels il est conduit s'accordent assez bien avec ceux que donne l'observation.

M. Gauss a publié une remarquable et savante théorie mathématique, dans laquelle il rejette tout centre d'action, et regarde chaque partie du globe comme renfermant du magnétisme libre agissant sur chaque point de sa surface. Il établit des formules à l'aide desquelles il obtient la résultante de toutes les actions sur un point donné. Des calculs numériques appliqués à 91 lieux du globe, lui ont donné des résultats d'accord avec ceux de l'observation. Dans le cours de ses calculs, M. Gauss a été conduit à attribuer à chaque huitième de mètre cube de la terre; une force magnétique moyenne, égale à celle d'un barreau d'acier aimanté pesant $\frac{1}{2}$ kilogramme.

Magnétisme des roches. — Dans cette théorie, les irrégularités dans la distribution du magnétisme sont attribuées à des attractions locales. De semblables attractions existent, en effet; Melloni a montré que la plupart des roches volcaniques sont magnétiques. On connaît des collines, de petites montagnes, qui ont, comme les aimants, des pôles et une ligne neutre. De Humboldt en cite une, le Heidelberg, près de Zell, dirigée du S.-O. au N.-O., dont le versant S.-E. possède les propriétés du pôle nord d'un aimant, et le versant N.-O., celles du pôle sud. L'action sur l'aiguille aimantée se fait sentir à 8 à 10 mètres. La montagne est formée de couches parallèles à son axe longitudinal, et la roche qui la compose renferme des parcelles de fer oxydulé, qu'on en peut séparer en la pulvérisant et la remuant avec un aimant. Dans certaines parties, ces parcelles sont visibles à l'œil nu.

1258. De l'explication des variations. — Pour expliquer les variations *séculaires*, Halley supposait dans l'intérieur du globe, un noyau magnétique tournant très lentement. Æpinus le supposait fixe, mais il admettait que le fluide magnétique se déplaçait peu à peu dans son intérieur.

Pour expliquer les variations *diurnes* de la déclinaison, M. Duperrey remarque que l'aiguille est perpendiculaire à la ligne isodynamique sur laquelle elle se trouve. Or, la chaleur diminuant l'intensité magnétique de la terre, et le soleil échauffant le sol d'orient en occident, la ligne isodynamique, dans notre hémisphère, se renfle et se porte vers le nord, à l'est de la station; et

pour que l'aiguille lui reste perpendiculaire, il faut que son extrémité nord s'avance vers l'ouest. Quand le soleil a dépassé le méridien, le sol se refroidit à l'est de l'aiguille, et s'échauffe à l'ouest, où se forme le renflement, et l'aiguille revient sur ses pas. Dans l'hémisphère austral, l'extrémité nord se porte d'abord vers l'orient, la courbe isodynamique se renflant vers le pôle sud. Prés de l'équateur magnétique, ou mieux de la ligne du minimum d'intensité, le mouvement du matin se fait vers l'ouest ou vers l'est, suivant que le soleil est au nord ou au sud de la station, d'après la saison. La période nocturne s'expliquerait de la même manière par le renflement des lignes isodynamiques vers l'équateur à cause de l'augmentation d'intensité par le refroidissement ; et les perturbations, par une distribution irrégulière et accidentelle de la chaleur.

Les variations magnétiques dépendant de la position du soleil, M. Biot pense qu'on peut les expliquer en supposant que le soleil agit comme un aimant très puissant et très éloigné. M. Secchi a repris et développé cette hypothèse, qui rend bien compte de la période semi-diurne et de la différence d'amplitude du jour et de la nuit, l'influence du soleil devant être plus grande lors de son passage au méridien supérieur, que lors de son passage au méridien inférieur. Ajoutons que M. A. Gautier a remarqué une relation singulière entre la période décennale remarquée par M. Schwabe, dans la distribution des taches du soleil, et une période décennale remarquée par M. Lamont, dans l'amplitude des variations diurnes, un minimum ayant eu lieu au milieu de l'année 1843, et des maximum, en 1837 et 1848, années où le nombre des taches solaires a présenté aussi un minimum et des maximum. Mais il faudra observer pendant bien des années encore pour que ces périodes décennales et leur coïncidence puissent être considérées comme autre chose que des résultats fortuits.

Remarquons enfin que M. Kreil et M. Sabine ont fait ressortir de la comparaison d'un grand nombre de résultats, une relation entre l'heure lunaire et les variations de la déclinaison. Ici il ne peut plus être question d'une influence de la température.

Nous voyons, d'aprés cette énumération succincte des hypothèses par lesquelles on a cherché à expliquer les particularités du magnétisme terrestre, que la question est à peine ébauchée. Nous verrons (ch. VI, § 2) que tous ces phénoménes peuvent s'expliquer par des actions électriques. Dans ce nouveau système, les fluctuations et les changements perpétuels de l'état magnétique, se conçoivent facilement, et sont bien en harmonie avec l'extrême mobilité de l'agent électrique.

CHAPITRE II.

ÉLECTRICITÉ STATIQUE.

Avançons, contemplons comment un art mortel
Ravit aux dieux la foudre, et ses flèches au ciel.
(DELILLE, *Les trois règnes*, chant I).

§ 1. — DÉVELOPPEMENT DE L'ÉLECTRICITÉ PAR LE FROTTEMENT ET THÉORIE DES DEUX FLUIDES.

I. Du développement de l'électricité par le frottement.

1259. Phénomènes généraux. — Quand on frotte du verre, de la résine, du soufre, avec de l'étoffe, du cuir, des feuilles de plomb..., les corps frottés acquièrent la propriété d'attirer les corps légers, tels que des petits morceaux de papier, de liége, ou de moelle de sureau, des lambeaux de feuilles d'or, des barbes de plume, etc. (*fig.* 922). Si le corps frotté présente une masse assez considérable et qu'on en approche le doigt, on entend un léger pétillement, et, dans l'obscurité, on aperçoit une petite aigrette lumineuse. Enfin, quand on approche ce corps du visage ou des mains, on éprouve une impression particulière que Hauksbée comparait à celle que produit une toile d'araignée. Si l'on vient à passer la main sur toute la surface du corps frotté, on fait disparaître les propriétés que le frottement lui avait communiquées.

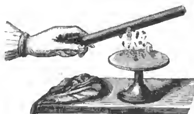


Fig. 922.

La cause de ces phénomènes a reçu le nom d'*électricité*, du nom grec de l'ambre ou succin (ἤλεκτρον), sur lequel la propriété attractive a d'abord été

observée. De ce mot, on a tiré une foule de termes dérivés, dont le sens se comprendra facilement quand nous aurons à les employer. Il faut remonter jusqu'à Thalès de Milet, 600 ans avant notre ère, pour trouver les premiers indices de la connaissance de l'attraction qu'exerce l'ambre frotté [1]. Ce phénoméne, dont Théophraste fait mention dans son *Traité des pierres précieuses*, était le seul fait connu des anciens, et l'ambre et le jayet les seules substances sur lesquelles on l'eût observé avant le XVI[e] siècle. Gilbert fit sortir la science de l'électricité de sa longue enfance, comme il avait fait pour le magnétisme ; il constata la propriété de *s'électriser* dans la plupart des pierres précieuses, les résines, la gomme laque, le soufre, le verre, etc. Il reconnut que les phénoménes s'observent beaucoup plus facilement par un temps sec que par un temps humide. Depuis, une foule d'observateurs, Wilte, Otto de Guericke, Hauksbée, Gray, Dufay, Nollet, Franklin, Wilson, Æpinus, Beccaria, Cavallo, Coulomb, etc., augmentèrent la liste des corps *électriques*.

Electroscopes. — Pour expérimenter, on approche simplement le corps frotté, de corps légers placés sur une table, et on les voit se précipiter sur lui (*fig.* 922); ou bien on emploie le *pendule électrique* (*fig.* 924), formé d'une balle de moelle de sureau suspendue à un fil. On se sert encore de l'*aiguille électrique* (*fig.* 923), qui n'est autre chose qu'un petit levier suspendu sur un pivot, et terminé par deux balles métalliques. Ces divers instruments se nomment des *électroscopes*.



Fig. 923.

Otto de Guericke, au lieu d'expérimenter sur de simples cylindres, employa des globes de verre ou de soufre qu'il faisait tourner rapidement sur eux-mêmes, pendant qu'un aide appliquait les mains sur leur surface afin d'exercer un frottement énergique. Il imagina ainsi la première *machine électrique*. Dés-lors, les expériences purent se faire avec facilité, et, suivant l'expression de Romas, « les physiciens eurent, dans le cours de quelques années, beaucoup plus d'idées justes de l'électricité que les anciens philosophes n'en avaient conçu de fausses dans l'espace de 2000 ans. » C'est ainsi que Otto de Guericke découvrit l'étincelle électrique qui jaillit d'un corps électrisé quand on en approche le doigt ; Boyle remarqua que les attractions s'exercent à travers les corps. On voit (*fig.* 923) comment on opère à travers les parois d'une cloche. Newton avait déjà constaté qu'une lame de verre frottée d'un côté attirait de l'autre. Boyle remarqua aussi que les substances frottées paraissent lumineuses dans l'obscurité, et répandent une légère odeur, qu'il compare à celle du phosphore ou de l'acide nitrique. Il démontra que l'ambre attire dans le vide, et qu'un corps électrisé est attiré par un corps à l'état

[1] De Humboldt a trouvé avec surprise que les enfants des Sauvages des bords de l'Orénoque, race des plus dégradées, s'amusaient à faire attirer des corps légers par certaines graines lisses et aplaties, après les avoir vivement frottées.

naturel ; il entrevit ainsi l'égalité de l'action et de la réaction , principe que Newton devait développer plus tard.

1260. Propagation de l'électricité dans certains corps. — Pendant longtemps on a divisé les corps en corps *idio-électriques* ou susceptibles de s'électriser par le frottement, et corps *anélectriques*, qui ne pouvaient pas s'électriser. Mais cette distinction ne tard apas à disparaître de la science, pour être remplacée par une autre. Gray, aidé de Weller, découvrit par hasard, en 1722, 125 ans après Gilbert, que la vertu électrique peut se propager dans certains corps. Ayant frotté un tube de verre fermé par un bouchon en liége , il vit avec surprise, le bouchon attirer quoiqu'il n'eût pas été frotté. Il en conclut qu'il avait reçu cette propriété, du verre, par communication. Il implanta alors dans le bouchon une tige de sapin terminée par une boule d'ivoire, et reconnut que la faculté d'attirer s'était propagée jusqu'à la boule. Voulant savoir jusqu'où pouvait aller une pareille transmission, il monta à une fenêtre élevée et suspendit au bouchon un fil de fer qui descendait presque jusqu'au sol. Ayant ensuite frotté le tube de verre, il vit l'extrémité inférieure du fil de fer attirer des corps légers , qu'un autre observateur en approchait. Cette transmission de la vertu attractive se fait avec une rapidité telle qu'on peut la regarder comme instantanée; c'est pourquoi on a considéré l'électricité comme un *fluide* extrêmement subtil, se répandant dans certains corps avec une excessive rapidité, et on l'a désigné sous le nom de *fluide électrique*.

L'électricité ne peut se propager également dans tous les corps ; les corps anélectriques sont propres à cette propagation, et les corps idio-électriques s'opposent, au contraire, au passage du fluide. C'est encore le hasard qui mit Gray sur la voie de cette découverte. Il étudiait la transmission de l'électricité, d'un tube de verre à une boule d'ivoire, par une corde de chanvre tendue horizontalement, et soutenue par un fil de chanvre. Il n'obtint d'abord aucun résultat ; mais Weller ayant eu l'idée heureuse de remplacer le fil de suspension par un cordon de soie, la boule attira les corps légers dès qu'on frotta le tube de verre attaché à l'extrémité de la corde de chanvre. Le cordon de soie s'étant rompu, il fut remplacé par un fil de laiton qui se trouvait là par hasard, et la boule d'ivoire ne donna plus aucun signe d'électricité. Le cordon de soie ayant été rétabli, l'expérience put réussir de nouveau; et en suspendant ainsi une longue corde avec des cordons de soie, les deux observateurs purent conduire l'électricité à 765 pieds de distance, sans que l'effet parût diminué. Ils attribuèrent alors l'absence d'effet qu'ils avaient d'abord constaté, à ce que le fluide électrique se perdait par le fil de laiton ou de chanvre, tandis que la soie s'opposait à son passage. Des expériences multipliées leur montrèrent alors que les corps se divisent en corps qui laissent facilement passer l'électricité, et en corps qui s'opposent à son passage. Les premiers furent nommés *bons conducteurs*, et les autres *mauvais conducteurs* de l'électricité.

1261. Tous les corps s'électrisent par le frottement. — Six ans après, Dufay fit voir que tous les corps sont susceptibles de s'électriser par le

frottement, quand on a soin de tenir ceux qui sont bons conducteurs, par l'intermédiaire de substances mauvaises conductrices. Ainsi, on peut électriser un cylindre de métal par le frottement, quand on a soin de le fixer au bout d'un tube de verre que l'on tient à la main. Cette découverte une fois faite, on essaya d'électriser toutes sortes de corps, même le corps des animaux. Sympson électrisa un chat, en passant la main sur son dos; les poils se hérissaient, étaient attirés par la main, et dans l'obscurité, par un temps sec, chaque friction était accompagnée d'une lueur. Les cheveux longs s'électrisent par le passage du peigne, surtout les blonds, et chaque coup de peigne produit une lueur très distincte. Brydone a pu rassembler sur des conducteurs suspendus à des fils de soie, l'électricité dégagée sur un chat. Il a pu tirer des étincelles de deux personnes, montées sur des blocs de résine qui s'opposaient à la perte de l'électricité, et dont l'une passait le peigne dans les cheveux de l'autre ; les cheveux n'avaient été ni poudrés, ni pommadés depuis plusieurs mois. Antérieurement, Gray avait transmis le fluide électrique d'un morceau de résine, au corps d'un enfant couché sur des cordons de soie tendus horizontalement, et avait vu les corps légers attirés par ses mains. Plus tard, Dufay avait excité une admiration générale en tirant des étincelles du corps d'un enfant suspendu de la même manière.

Quand l'air est bien sec, on voit l'électricité paraître d'une manière tout-à-fait inattendue. Par exemple, on a vu à New-York, des personnes se charger d'électricité en marchant sur des tapis de laine, au point de donner des étincelles quand elles s'approchaient de corps bons conducteurs. La maison était construite avec des matériaux mauvais conducteurs et très secs. — Colladon a vu, dans plusieurs filatures, à Mulhouse, le frottement des mèches de coton qui glissent dans des anneaux métalliques destinés à les guider, produire beaucoup d'électricité. Quand l'air est sec, cette électricité se conserve, et les filaments qui flottent dans l'air s'amassent sous forme de houppes, sur les parties saillantes des métiers, au point d'en entraver le jeu.

Le frottement des liquides produit aussi de l'électricité : quand on agite du mercure bien sec dans un verre, on voit des lueurs, dans l'obscurité, et le verre est électrisé. Dans l'expérience de la pluie de mercure (I,37), on aperçoit des lueurs assez vives, et le mercure est électrisé ; car le tube de verre attire les corps légers, et il ne peut avoir reçu d'électricité que des gouttelettes de mercure qui l'ont touché dans leur chute. Picard a remarqué, le premier, qu'en déplaçant brusquement le niveau du mercure dans le tube d'un baromètre, il se produit des lueurs. Hauksbée a reconnu que ce phénomène se produit encore dans le vide imparfait, et il l'a, le premier, attribué à l'électricité. Pour qu'un liquide électrise un solide par le frottement, il faut qu'il ne le mouille pas.

Les gaz produisent aussi de l'électricité par le frottement. Hauksbée ayant fait passer de l'air par bulles à travers du mercure placé sous le récipient de la machine pneumatique, le mercure parut tout en feu dans l'obscurité. Wilson a électrisé des lames de verre au moyen du vent d'un soufflet, par un temps

bien sec. L'expérience réussit de même avec la résine, la gomme laque; le résultat est bien plus marqué quand l'air que l'on insufle est mêlé de poussière. L'air, qui sort d'un fusil à vent, produit une lueur, quand la bourre contient un peu de poussière; tandis qu'elle n'en produit pas quand elle est bien propre... En général, toutes les fois que deux corps sont frottés l'un par l'autre, il se dégage de l'électricité. Il n'y a que le cas de deux liquides ou de deux gaz qui laisse du doute; mais les circonstances sont telles qu'il est presque impossible d'apercevoir, dans ce cas, l'électricité dégagée.

1262. Des corps bons ou mauvais conducteurs. — Tous les corps étant susceptibles de s'électriser par le frottement, on voit que la distinction en anélectriques et idio-électriques ne peut plus être conservée; mais il faut diviser les corps en *bons conducteurs* et en *mauvais conducteurs* de l'électricité. Ces derniers se nomment aussi *corps isolants*, parce qu'on s'en sert pour séparer du sol les corps bons conducteurs sur lesquels on veut conserver l'électricité, qui, sans cette précaution, se perdrait dans la terre. Le globe, considéré à ce point de vue, porte le nom de *réservoir commun*.

Parmi les corps isolants, nous citerons la *gomme laque* [1], la cire d'Espagne, le diamant, les pierres précieuses transparentes, les résines, le soufre, l'ambre, le verre, la porcelaine, le caoutchouc, le gutta-percha, la soie... L'air sec est mauvais conducteur, sans cela les phénomènes électriques nous seraient inconnus. Remarquons que les plus mauvais conducteurs laissent toujours un peu passer l'électricité.

Les bons conducteurs sont les métaux, le corps des animaux, le lin, le chanvre, les liquides, excepté les huiles. La plombagine est aussi un bon conducteur. Le charbon de bois présente une particularité importante à remarquer: calciné, il conduit fort bien, tandis qu'il est mauvais conducteur dans son état ordinaire. Nous avons vu qu'il en est de même pour la chaleur. On peut dire, en général, que les corps solides qui sont bons ou mauvais conducteurs pour la chaleur sont dans le même cas pour l'électricité.

Les pierres, les briques, le bois surtout quand il est sec, la moelle de sureau, conduisent imparfaitement l'électricité.

Les vapeurs, particulièrement la vapeur d'eau, conduisent bien; aussi, l'air devient-il conducteur quand il est humide, ce qui rend alors les expériences d'électricité très difficiles. Le verre, qui est très hygrométrique (II, 1154), cesse

[1] La gomme laque est une espèce de résine rouge-brun, provenant d'un suc desséché qui s'écoule, sous forme d'un liquide laiteux, des tiges de plusieurs arbres de l'Inde (*Ficus indica*, *F. religiosa*, *Rhamnus jujuba*...), quand ils sont piqués par la femelle d'un certain insecte (*Coccus lacca*). L'animal reste renfermé et se multiplie dans ce liquide, qui durcit peu à peu. On sépare la substance résineuse pure, en dissolvant la matière dans l'alcool froid, filtrant et évaporant. La cire à cacheter n'est autre chose que de la gomme laque mêlée d'un peu de térébenthine, et colorée avec du vermillon; elle nous venait autrefois de l'Inde par l'Espagne, d'où lui est venu son nom de cire d'Espagne.

d'isoler quand il se recouvre d'humidité ; il faut alors le dessécher au moyen de linges chauds. Pour éviter cet inconvénient, on le recouvre dans les appareils électriques, d'une couche de gomme laque, qui n'est pas hygrométrique, et qu'on applique en la dissolvant dans l'alcool.

Circonstances qui modifient la conductibilité des solides. — Le pouvoir conducteur des solides dépend de leur nature; mais il peut dépendre aussi, pour une même substance, de la structure : ainsi, le diamant est mauvais conducteur, tandis que la plombagine conduit bien. Le verre pulvérisé et la fleur de soufre conduisent assez bien. La cire et le suif conduisent, à l'état liquide, mais non à l'état solide. La glace froide et sèche isole, tandis que l'eau conduit bien.

Influence de la chaleur. — La chaleur communique à tous les corps la propriété de conduire l'électricité. Par exemple, le verre brûlant est conducteur. Le soufre, la gomme laque échauffés, les gaz même, sont dans ce cas : en plaçant une petite lampe métallique à alcool allumée, à 2^m au-dessous d'un corps électrisé, elle attire les corps légers, si elle est isolée ; tandis que, lorsqu'elle est éteinte, elle ne présente aucun signe d'électricité, même quand elle est placée à quelques centimètres du corps électrisé.

II. Théorie des deux électricités. — Décomposition par influence.

1263. DES DEUX ESPÈCES D'ÉLECTRICITÉ. — Dufay, qui a prouvé que tous les corps peuvent s'électriser, a aussi distingué deux espèces d'électricités; voici par quelles expériences : on suspend une balle de moelle de sureau *a* à un fil de soie (*fig.* 924), et l'on en approche un cylindre de résine électrisé. La balle est attirée, mais dès qu'elle a touché le cylindre, l'attraction se change en répulsion, *r*. Ce fait, observé d'abord par Otto de Guericke, n'a lieu qu'après que la balle, qui est isolée, a emprunté au cylindre de résine une partie de son électricité, comme on peut s'en assurer directement en approchant la main de cette balle, qui est aussitôt attirée. Si on lui enlève son électricité en la touchant avec la main, la balle est de nouveau attirée par le bâton de résine. Si maintenant on approche un bâton de verre électrisé, de la balle repoussée par le bâton de résine, cette balle est attirée, et l'attraction est plus vive que si la balle était à l'état naturel. De même si l'on fait toucher la balle de moelle de sureau au verre électrisé, elle en est repoussée; mais elle est alors attirée par la résine élec-

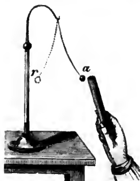


Fig. 924.

trisée. On voit donc que la balle, dans un même état, est repoussée par l'une des substances électrisées, et attirée par l'autre; d'où l'on a conclu que l'électricité développée par le frottement sur le verre, est d'une espèce différente de celle que reçoit la résine. La première a reçu le nom d'*électricité vitrée* ou *électricité positive*, et l'autre le nom *d'électricité résineuse* ou *électricité négative*, et on les désigne par les signes + et —. Nous verrons plus loin que l'espèce d'électricité que reçoit le verre ou la résine, dépend de la nature du corps avec lequel on les frotte; c'est pourquoi, pour que la définition des deux fluides soit complète, nous dirons que l'*électricité vitrée est celle qui se dégage sur le verre, et l'électricité résineuse celle qui se dégage sur la résine, quand on les frotte avec de la laine.*

Actions mutuelles des deux fluides. — Remarquons que lorsqu'il y a répulsion, les deux corps en présence sont chargés de la même espèce d'électricité, et quand il y a attraction, ils renferment des électricités différentes. Or, il est naturel d'admettre que les actions attractives ou répulsives des corps électrisés sont la conséquence des actions exercées par les deux fluides l'un sur l'autre. On dira donc, comme pour le magnétisme, que *les fluides de même nom s'attirent, et les fluides de nom contraire se repoussent;* ce que l'on pourra vérifier avec deux pendules, qui se repousseront si on leur a communiqué la même électricité par le contact du verre ou de la résine frottés, et s'attireront s'ils sont chargés d'électricités contraires.

Si l'on approche d'un pendule électrisé par la résine, un corps quelconque électrisé, il y aura attraction ou répulsion. Dans le premier cas, le corps sera chargé d'électricité vitrée, et dans le second, d'électricité résineuse.

1264. Production simultanée des deux électricités. — Après qu'on eut distingué les deux électricités, Wilke reconnut qu'elles se produisent toujours en même temps, l'une se portant sur le corps frotté, l'autre sur le corps frottant. L'un des fluides ne peut naître sans l'autre, et si, ordinairement, on n'en aperçoit qu'un seul, c'est que l'autre se perd dans le réservoir commun, le corps qui le reçoit n'étant pas isolé. Si l'on frotte l'un contre l'autre deux plateaux tenus par des manches de verre (*fig.* 925), et qu'on les sépare ensuite brusquement, on les trouve chargés d'électricités de nom contraire; ce que l'on reconnaît au moyen du pendule électrique préalablement chargé d'une électricité connue.



Fig. 925.

Quand on frotte l'un contre l'autre deux corps de même substance, il peut arriver qu'on n'aperçoive qu'une seule électricité, c'est que l'autre s'est perdue par quelque voie qu'on finit toujours par découvrir. Par exemple, Bergmann a vu deux plumes d'oie s'électriser toutes les deux positivement quand il les frottait l'une contre l'autre; et M. Faraday a vu, deux bandes de flanelle frottées en croix prendre l'une et l'autre le fluide négatif. Dans ces deux expériences, le fluide de nom contraire à celui que l'on observe est emporté par les parcelles

que le frottement détache des surfaces ; ce que l'on reconnaît en recevant ces parcelles sur une plaque de métal isolée, sur laquelle on constate la présence de cette électricité.

La nature de l'électricité que prend un corps, dépend nécessairement de la substance avec laquelle on le frotte, puisque celle-ci a aussi une certaine tendance, d'après sa nature, à prendre une électricité plutôt que l'autre : ainsi, le verre s'électrise positivement quand on le frotte avec du drap, et négativement, avec une peau de chat et avec les pierres précieuses plus dures que lui. Dans la liste qui suit, les substances frottées avec celles qui les suivent prennent l'électricité positive, et l'électricité négative, quand on les frotte avec celles qui les précèdent.

Peau de chat, verre poli, laine, plumes, bois, papier, soie, gomme laque, résine, verre dépoli.

Le mercure paraît être la substance qui a le plus de tendance à prendre l'électricité négative : un bâton de résine s'électrise *positivement* quand on le plonge dans le mercure et qu'on l'en retire aussitôt.

Influence de la surface. — Un même corps frotté avec la même substance peut prendre l'une ou l'autre électricité, suivant l'état de sa surface. C'est ainsi que le verre frotté avec du drap s'électrise positivement quand il est poli, et négativement quand il est dépoli. Canton, ayant pris un bâton de verre, dépoli sur la moitié de sa longueur, et l'ayant frotté avec du drap non isolé, la moitié polie fut électrisée positivement, et l'autre négativement. Si l'on frotte deux plaques de verre l'une sur l'autre, chacune d'elles prend tantôt l'électricité positive, tantôt la négative, comme l'a constaté Æpinus ; mais si l'une des plaques est dépolie, elle prend toujours le fluide négatif.

Il suffit d'une modification invisible de la surface du verre pour qu'il prenne le fluide négatif. M. Heintz[1] a fait à ce sujet des expériences curieuses. Ayant frotté un tube de verre avec de la poudre fine d'émeri humide, puis l'ayant lavé avec soin, il trouva que ce tube prenait le fluide négatif quand on le frottait doucement avec du drap, quoique sa surface ne présentât aucun changement apparent. En frottant ensuite plus fortement, le fluide positif reparaissait. Le verre acquiert encore la propriété de s'électriser négativement avec le drap, le cuir, la soie et même les métaux, quand on l'a exposé à l'action d'une flamme quelconque, surtout de celle de l'hydrogène. Le cristal de roche, le spath d'Islande, le spath pesant, le gypse, sont dans le même cas. Tous ces corps avaient été refroidis, puis lavés et nettoyés avec soin. La modification produite à la surface n'est pas due à la chaleur seule ; car un bâton de verre chauffé dans un tube bien fermé continue à donner de l'électricité positive. Elle n'est pas due aux substances chimiques formées par la flamme ; car l'acide

[1] *Archives de l'électricité*, par M. A. De la Rive, t. III, p. 742.

carbonique très chaud et la vapeur d'eau ne produisent aucun effet, tandis que la flamme de l'oxyde de carbone et de l'hydrogène rendent le verre négatif. Un bâton de verre plongé dans un acide concentré, puis lavé avec soin, prend encore l'électricité négative, quand on le frotte modérément. Les alcalis ne produisent rien. Ces modifications invisibles de la surface peuvent être rapprochées de celles qui ont été observées par M. Marcet dans des ballons de verre (II, 955); elles ne disparaissent pas avec le temps, mais on peut les détruire par un frottement plus ou moins prolongé.

Un minéral, la *cyanite*, présente cette particularité que certains échantillons s'électrisent positivement et d'autres négativement. Un même cristal peut même présenter, sur ses différentes faces, des tendances électriques opposées; c'est pour cela que Haüy a donné à cette substance le nom de *disthène*.

Un ruban de soie blanc frotté sur un ruban noir, prend l'électricité vitrée, et le ruban noir, le fluide résineux; ce que Inghenhousz attribue à une âpreté communiquée au ruban noir par la teinture. Cigna ayant posé deux bandes de soie blanches l'une sur l'autre, et ayant passé l'angle d'une règle d'ivoire sur celle qui était en dessus, la trouva électrisée négativement, tandis que celle de dessous avait l'électricité positive. Un ruban de soie étant frotté par un ruban identique que l'on fait glisser transversalement en un de ses points, prend le fluide négatif, et le ruban mobile le fluide positif.

Influence de la chaleur. — M. Dessaigne a découvert que la chaleur donne aux corps une tendance à prendre le fluide négatif[1]. Si l'on frotte l'un sur l'autre deux disques de verre identiques, mais dont l'un soit plus chaud que l'autre, le plus chaud prend le fluide négatif. Si l'on frotte un bâton de verre avec une feuille de plomb, le verre prend l'électricité positive; mais si, en pressant fortement, on vient à l'échauffer, il s'électrise négativement. On peut s'expliquer maintenant ce résultat, remarqué par Bergmann, que, de deux surfaces de même nature, celle qui reçoit le plus de frottement s'électrise négativement : c'est qu'elle s'échauffe le plus; et l'on voit pourquoi, dans les expériences citées ci-dessus, le ruban de soie noire, le ruban blanc frotté par la règle, le ruban fixe sur lequel on en fait glisser un autre transversalement, prennent le fluide négatif.

1265. DES THÉORIES ÉLECTRIQUES. THÉORIE DE SYMMER. — Nous avons maintenant les éléments nécessaires pour établir la théorie électrique généralement adoptée. Dans cette théorie, on admet l'existence de deux fluides particuliers, l'*électricité vitrée* et l'*électricité résineuse*. Chacune d'elles repousse le fluide de même espèce et attire celui d'espèce contraire. On admet, en outre, que tous les corps contiennent, en quantité indéfinie, une troisième espèce de fluide nommée *électricité neutre*, et qui est formée par la réunion de l'électricité vitrée et de l'électricité résineuse; le frottement, par un mode d'action qui nous est inconnu, décompose le fluide neutre en séparant les deux

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XLII, p. 33.

électricités, de manière que l'une d'elles se porte sur le corps frotté, et l'autre sur le corps frottant. Ces électricités sont en quantités égales, sur deux disques identiques et isolés que l'on a électrisés en les frottant l'un contre l'autre ; car, si on les place de part et d'autre et à égale distance d'un pendule électrique, ce pendule reste en équilibre. Si l'on vient à rapprocher les deux disques l'un de l'autre, on voit jaillir une étincelle, et tout rentre à l'état neutre. Du reste, la nature des fluides électriques est tout à fait inconnue ; tout ce qu'on peut dire, c'est que l'électricité se comporte comme un fluide très subtil, tendant à se répandre en vertu de la répulsion qui existe entre ses parties ; se répandant, en effet, sur les corps bons conducteurs, avec une rapidité extrême, dont nous nous occuperons plus tard, et ne pouvant se mouvoir dans les corps mauvais conducteurs.

Théorie de Franklin. — La théorie des deux fluides est due à Symmer, elle a été précédée de beaucoup d'autres, proposées par Dufay, Hauksbée, et surtout Nollet; mais elles ont été toutes abandonnées, quand on a eu à expliquer d'autres faits que les attractions et répulsions. Une théorie célèbre, qui fut accueillie avec transport, et vers laquelle quelques physiciens semblent pencher de nouveau, est celle de Franklin. Dans cette théorie, on n'admet qu'une seule espèce d'électricité, dont les parties se repoussent entre elles, et qui est unie aux molécules des corps, en quantité dépendant de leur nature, et constituant, pour chacun d'eux, un état d'équilibre naturel dans lequel le fluide ne produit aucun effet extérieur. Vient-on à augmenter cette dose d'électricité, le corps est électrisé *en plus* ou *positivement ;* vient-on, au contraire, à lui enlever une partie de son électricité naturelle, il est électrisé *en moins* ou *négativement*. C'est là l'origine des noms d'électricité *positive* et d'électricité *négative*. Le frottement fait passer l'électricité d'un des corps mis en présence sur l'autre corps, de sorte que ces deux corps sont électrisés, l'un en plus, l'autre en moins ; si on les met en communication, l'équilibre se rétablit. La répulsion des corps électrisés *en plus* s'explique par celle qu'exerce le fluide électrique lui-même. L'attraction d'un corps électrisé *en plus*, sur un corps à l'état naturel ou sur un corps électrisé *en moins*, et la répulsion entre deux corps électrisés *en moins*, sont dues, d'après Franklin, à des mouvements que l'électricité, en cherchant son équilibre, communique à l'air. Mais, indépendamment des difficultés qui se présentent quand on veut développer cette explication, les attractions et répulsions des corps mauvais conducteurs électrisés, ont lieu dans le vide comme dans l'air. De plus, Æpinus ayant soumis au calcul le système de Franklin, trouva que, pour expliquer la répulsion des corps électrisés *négativement*, il faudrait admettre que les molécules des corps se repoussent au lieu de s'attirer. Æpinus imagina alors un autre systèmemoins sujet à objections, mais qui n'eut pas cependant la vogue du premier. Jusque-là on n'avait admis qu'un seul fluide. Les expériences de Dufay, confirmées par Kinnersley, firent songer à en admettre deux. C'est alors que Symmer développa la théorie des deux fluides, au moyen de laquelle il put rendre compte de tous

les phénomènes connus de son temps. La *décomposition par influence*, dont nous allons traiter, n'a fait que la confirmer. Nous aurons aussi à signaler plus d'une fois des phénomènes dans lesquels se manifestent des caractères distincts des deux fluides.

Remarque. — La théorie de Symmer n'est pas à l'abri d'objections. Il ne faut pas oublier qu'elle repose sur une hypothèse, celle de l'existence de *fluides* particuliers, auxquels on attribue des propriétés qui ne sont que la traduction des phénomènes. Ces fluides doivent donc être considérés comme une sorte de symbolisme, une espèce de formule servant à représenter les faits. Tout ce qu'on peut dire avec certitude, c'est que certaines actions exercées sur les corps y développent des forces agissant d'une manière opposée, mais dont la nature nous est inconnue. Cependant, comme l'hypothèse des fluides, non seulement rend compte des phénomènes qui ont servi à l'établir, mais encore se plie facilement et naturellement à l'interprétation de tous les autres, et qu'elle a permis de prévoir une foule de faits que l'expérience a ensuite vérifiés, on doit la considérer comme formant un jalon sur le chemin qui doit conduire plus tard à la découverte de la cause première; il faudra un jour renoncer à l'idée des fluides, mais le mode d'action de la cause réelle devra être, sans doute, toujours interprété de la même manière, car les choses se passent comme s'ils existaient.

Aujourd'hui, on cherche à rattacher les actions électriques à des mouvements particuliers de l'éther, et à rapprocher ainsi les phénomènes de l'*électricité*, de ceux de la *chaleur* et de la *lumière*. Nous verrons, en effet, qu'il y a de nombreux points de contact entre ces divers ordres de phénomènes; mais la science, à ce sujet, ne présente encore, pour ainsi dire que des pressentiments, et l'on n'est pas encore parvenu à lier par cette nouvelle théorie l'ensemble des phénomènes électriques.

Nous adopterons donc ici la théorie de Symmer, tout en indiquant en quelques mots, quand l'occasion s'en présentera, les explications fournies par celle de Franklin. Nous aurons aussi l'occasion de faire voir comment certains phénomènes qui se manifestent dans les mauvais conducteurs, ont conduit M. Faraday à modifier, à certains égards, la théorie des deux fluides.

1266. DÉCOMPOSITION DE L'ÉLECTRICITÉ PAR INFLUENCE. — Dans la théorie de Symmer, on admet que tous les corps contiennent une quantité indéfinie de *fluide neutre*, et que l'électrisation consiste dans la séparation des deux électricités qui le composent. Cette hypothèse reçoit la confirmation la plus heureuse du phénomène de la décomposition par influence.

Considérons un cylindre métallique isolé AB (*fig.* 926), au-dessous duquel on a suspendu, par des fils de lin, des couples de balles de sureau *a*, *b*, *c*, *c′ b′ a′*, et approchons de ce cylindre un corps électrisé V. Aussitôt, nous verrons les balles de sureau de chaque couple s'écarter l'une de l'autre, et d'autant plus qu'elles sont plus rapprochées des extrémités; celles du milieu restant seules en repos. Ces effets prouvent la présence de l'électricité aux extrémités du

cylindre AB. On reconnaît de plus, au moyen d'un bâton de résine électrisé, que l'extrémité A est chargée de fluide de nom contraire à celui du corps V, tandis que l'extrémité B renferme du fluide de même nom. Ce résultat est aussi indiqué par l'inclinaison des balles *a* et *a'*, dont les premières se portent vers le corps V, tandis que les autres s'en écartent. Ces faits s'expliquent

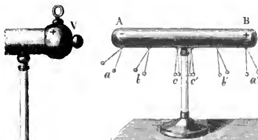


Fig. 926.

facilement dans la théorie de Symmer : le fluide neutre contenu dans le corps AB est décomposé par l'influence de l'électricité du corps V, laquelle attire le fluide de nom contraire et repousse le fluide de même nom, de manière à les séparer en vainquant leur attraction mutuelle, et à produire des quantités égales des deux fluides. C'est là ce que l'on désigne par ***électrisation par influence*** ou ***induction électrostatique***. Si l'on vient à éloigner le corps V, ou à lui enlever son électricité, les fluides séparés sur le corps AB se recombinent aussitôt en obéissant à leur attraction mutuelle, et ce corps rentre à l'état neutre. Il y a ici un phénomène analogue à celui qui se produit dans la décomposition du fluide magnétique neutre du fer doux sous l'influence d'un aimant (1197); seulement, tandis qu'il n'y a pas transport des fluides magnétiques, il y a ici réellement transport des deux électricités aux extrémités du corps AB ; si l'on compose ce corps, comme l'a fait Wilcke, de deux parties A et B soutenues chacune par une colonne de verre, et si on les sépare pendant que s'exerce l'influence du corps V, chaque partie emporte l'électricité qu'elle a reçue.

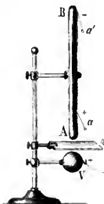


Fig. 927.

L'action exercée par le corps V sur les pendules *a*, ayant donné lieu à quelques objections, M. Riess dispose le conducteur AB verticalement, comme on le voit (*fig.* 927), le pendule *a* ne peut s'écarter du conducteur AB sous l'influence de l'électricité du corps V. *v* est une lame de verre à travers laquelle s'exerce l'induction sur AB.

La décomposition par influence n'a pas lieu sur les corps mauvais conducteurs, dans lesquels l'électricité ne peut se déplacer, à moins que le corps électrisé ne soit chargé d'une quantité de fluide assez grande pour vaincre la résistance au déplacement; alors les fluides restent séparés après qu'on a enlevé le corps V. Il y a ici analogie avec ce qui se passe dans l'action d'un aimant sur l'acier doué de force coërcitive (1201). Cette analogie se soutient dans le fait suivant, remarqué par Æpinus : ayant électrisé par le frottement, l'extrémité d'un tube de verre, il trouva à une certaine distance, du fluide négatif, puis du fluide positif jusqu'à l'extrémité opposée.

1267. Limite de l'électrisation par influence. — La décomposition par influence ne peut séparer que des quantités limitées de fluide positif et négatif; en effet, pour qu'une nouvelle quantité de fluide neutre se décompose, il faut que les fluides qui tendent à se séparer, se dirigent, l'un vers l'extrémité A, et l'autre vers B; mais les électricités déjà accumulées en A et B agissant par répulsion pour s'opposer à ce mouvement, quand elles seront en quantité suffisante, elles contrebalanceront l'action du corps V. Il est facile de voir que cet état d'équilibre aura lieu quand la quantité de fluide positif du corps AB, et par conséquent aussi la quantité de fluide négatif, sera moindre que celle qui est en V; car les électricités qui sont en A et B ajoutent leurs actions pour s'opposer à la décomposition d'une nouvelle quantité de fluide neutre; de plus, elles agissent à une moindre distance que l'électricité de V. Aussi, la quantité décomposée dépend-elle de la distance; si l'on rapproche le corps V, les pendules s'écartent davantage, ils se rapprochent, si l'on éloigne peu à peu ce corps.

Si l'on fait communiquer le cylindre AB avec le sol pendant que la décomposition a lieu, tous les pendules *c'b'a'*, retombent (*fig.* 926), tandis que les pendules *a* s'écartent davantage; et le cylindre AB ne possède plus que l'électricité de nom contraire à celle du corps V, que nous supposerons électrisé positivement. Ce résultat, trouvé par Æpinus, s'explique facilement : l'électricité positive de AB passe dans le sol, en vertu de sa tendance à se disperser, et aussi parce qu'elle est repoussée; tandis que l'électricité négative est retenue par attraction, et se porte plus complétement vers l'extrémité A, parce qu'elle est débarrassée de l'action du fluide positif qui l'attirait. De plus, la quantité d'électricité négative augmente instantanément par une nouvelle décomposition de fluide neutre, l'action de l'électricité qu'il y avait d'abord ne suffisant plus, quand elle est seule, pour contrebalancer l'action du fluide de V et empêcher une nouvelle décomposition. Du reste, quand le nouvel état d'équilibre est établi, il y a toujours moins d'électricité négative en A qu'il n'y en a de positive en V, parce que l'électricité de V agit à une plus grande distance que le fluide négatif qui est en A, sur le fluide neutre de AB.

Il est à remarquer qu'on obtient le même résultat en établissant la communication avec le sol par l'extrémité A, pour expliquer, dans ce cas, la disparition du fluide positif, remarquons qu'il se fait une décomposition par influence dans

le fluide neutre du conducteur avec lequel on établit la communication; le fluide positif provenant de cette décomposition est repoussé dans le sol, et le fluide négatif vient en A. Ce fluide est en plus grande quantité que celui qui se trouve en A. d'après ce que nous venons de voir; l'excédant se répandra donc sur le corps AB, et, arrivé en B, détruira le fluide positif qui s'y trouve, en formant du fluide neutre. — M. Riess indique des expériences qui viennent à l'appui de cette explication. On fait toucher au point A un long conducteur isolé, et l'on voit les pendules *a* s'écarter et les pendules *a'* se rapprocher en partie seulement, la décomposition dans le long conducteur étant limitée parce que l'électricité repoussée ne se perd pas dans le sol. Si ce conducteur est de petites dimensions, il ne fait qu'emprunter une partie de l'électricité de l'extrémité A, et les pendules *a* se rapprochent un peu.

Si, après avoir fait communiquer le corps AB avec le sol, puis avoir supprimé cette communication, on vient à enlever le corps V, l'électricité négative se répand sur le corps AB, et les pendules s'écartent également aux deux extrémités, mais moins que ne le faisaient d'abord les pendules *a*.

Souvent, quand on enlève le corps V pendant que les deux fluides séparés sont encore sur le corps AB, on voit que les pendules *a* et *a'* continuent à s'écarter un peu, et l'on trouve qu'ils renferment du fluide de nom contraire à celui du corps V. C'est qu'une partie du fluide repoussé a disparu en s'écoulant à travers l'air humide. C'est, en effet, quand il y a beaucoup d'humidité que ce résultat s'observe.

1268. Dans la théorie de Franklin, on explique l'induction de la manière suivante : si le corps V (*fig.* 843) est électrisé positivement, il repousse l'électricité du corps AB, qui se trouve alors électrisé en moins au point A, et en plus au point B. L'excès d'électricité qui est en B passe dans le sol quand on établit une communication. Si le corps V est électrisé en moins, le fluide naturel de AB se porte vers le corps V où la répulsion est moindre, et l'extrémité B est électrisée en moins; et si l'on établit une communication avec le sol, du fluide se porte du sol au point B pour y rétablir l'équilibre naturel, de sorte que sur le corps AB il y a un excès d'électricité.

La décomposition de l'électricité à distance a été découverte par Canton, en décembre 1753. Il résulte d'une lettre des missionnaires de Pékin arrivée en France deux ans après, qu'ils avaient découvert de leur côté ce phénomène important. Cigna, Franklin, Beccaria, Volta, mais surtout Wilke et Æpinus, en ont fait une étude approfondie. On a souvent à invoquer ce principe fécond ; nous allons en faire usage immédiatement, pour expliquer les attractions et répulsions électriques, l'emploi des électromètres, le jeu des machines électriques, et enfin l'étincelle électrique.

III. Explication des attractions et répulsions. — Electromètres.

1269. Attractions et répulsions des corps électrisés. — Les actions électriques ont lieu entre les fluides électriques ; la matière pondérable des corps ne se déplace donc qu'en vertu d'une cause qui leur fait suivre l'électricité qu'ils contiennent. Il y a deux cas à examiner : le corps électrisé, sollicité par un autre corps chargé d'électricité, peut être mauvais conducteur ou bon conducteur.

1° Si le corps est mauvais conducteur, l'électricité adhère à ses molécules, ne peut s'en séparer, et ce corps est alors forcé de suivre le mouvement du fluide qu'il contient. Les effets sont les mêmes dans le vide et dans l'air.

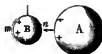


Fig. 928.

2° Si le corps électrisé, B (*fig.* 928), est bon conducteur et soumis à l'action d'un corps A chargé d'électricité de même nom, l'électricité de B est repoussée en *m*, où elle s'arrête, parce que l'air, mauvais conducteur, s'oppose à son mouvement au-delà de la surface du corps. Cette électricité appuie sur l'air, de manière à contrebalancer en partie la pression qu'il exerce en *m*. L'excès de la pression qui existe en *n* forcera donc le corps B à s'éloigner du corps A. Si les deux corps étaient chargés d'électricités contraires, on verrait de même que le corps B devrait s'avancer vers le corps A.

Il résulte de cette explication, que les actions mutuelles des corps bons conducteurs électrisés ne doivent pas se manifester dans le vide. C'est, en effet, ce qui a lieu; car l'électricité ne peut rester dans le vide sur les corps bons conducteurs, comme nous le verrons plus loin. Cependant, il paraît qu'un peu d'électricité peut aussi adhérer aux molécules des corps bons conducteurs; de manière que, lorsque la charge est faible, on peut voir ces corps se repousser pendant plusieurs jours dans le vide. Le phénomène s'explique alors, comme pour les mauvais conducteurs, par l'adhérence de l'électricité aux molécules du corps. Nous reviendrons sur ce sujet.



Fig. 929.

1270. Attraction sur les corps à l'état naturel. — 1° Supposons que le corps à l'état neutre *b* (*fig.* 929) bon conducteur et isolé, soit soumis à l'action d'un corps *a* électrisé positivement. Le fluide neutre de *b* sera décomposé par influence, et l'électricité négative, attirée en *n*, agira sur l'air, de manière à détruire une partie de sa pression. Le fluide positif repoussé en *m* en fera autant de son côté, mais moins fortement, parce que la distance au corps *a* est plus grande ; la pression atmosphérique sera donc contrebalancée en moins grande proportion du côté *m* que du côté *n*, et l'excès de la pression

en *m* poussera le corps *b* vers le corps *a*. Comme le mouvement est produit ici seulement par une différence d'action, on prévoit que l'attraction devra être faible; c'est, en effet, ce qui a lieu. — Si le corps *b* n'était pas isolé, le fluide repoussé s'écoulerait dans le sol, et l'attraction serait beaucoup plus vive. C'est pourquoi un pendule électrique obéit bien plus facilement à l'action des corps électrisés, quand le fil est de lin que lorsqu'il est en soie.

Il peut arriver qu'un corps conducteur *électrisé b*, soumis à l'action d'un autre corps *a* contenant la même espèce d'électricité, soit attiré au lieu d'être repoussé; c'est qu'il y a décomposition par influence de l'électricité neutre du corps *b*. Le fluide repoussé va se joindre à celui que possède déjà le corps, et le fluide attiré se porte vers le corps *a*; et il arrive, dans le cas où il y a attraction, que l'action de ce dernier fluide sur l'air l'emporte, à cause de la moindre distance, sur celle qu'exerce le fluide repoussé, quoiqu'il soit en plus grande quantité. Le magnétisme nous a présenté un phénomène semblable (1201).

2° Si le corps *b* est mauvais conducteur, la décomposition par influence ne peut s'effectuer, et il n'y a pas attraction. Cependant, quand l'action électrique est énergique, la décomposition peut se faire, la résistance au déplacement des fluides étant vaincue, et l'attraction se manifeste. On voit qu'il y a ici analogie avec ce qui se passe quand on soumet à l'action d'un fort aimant un corps doué de force coërcitive (1201), et de même que, dans ce dernier, la décomposition magnétique persiste, de même les fluides électriques restent séparés quand on enlève le corps *a*.

M. Matteucci a découvert un autre genre d'action, sur lequel nous reviendrons en étudiant le pouvoir conducteur des corps; il consiste en ce qu'il se fait, sous l'influence de l'électricité, dans les molécules des corps mauvais conducteurs, une décomposition électrique qui constitue ces corps dans un état analogue à celui du fer doux soumis à l'influence d'un aimant; car les fluides séparés dans les molécules n'en peuvent sortir pour se transporter dans le corps, et ce corps rentre à l'état neutre dès qu'on éloigne le corps électrisé. Cependant, si ce dernier était fortement chargé, les fluides séparés dans les molécules du premier pourraient en sortir et apparaître à la surface.

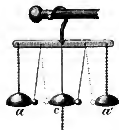


Fig. 930.

1271. On a imaginé une foule de petits appareils pour mettre en jeu les actions électriques. Nous citerons seulement les principaux.

Carillon électrique. — Deux timbres *a*, *c* (*fig.* 930) sont suspendus à une barre métallique; l'un, *a*, par une chaîne; l'autre, *c*, par un cordon de soie. Ce dernier est mis en communication avec le sol au moyen d'une chaîne. La barre est accrochée à une machine électrique, et entre les deux timbres est suspendue, par un fil de soie, une balle métallique.

L'électricité de la machine se répand sur le timbre *a*, qui attire le pendule, puis le repousse dès qu'il y a eu contact. De plus, ce pendule est alors attiré par le timbre *c*, qui est à l'état neutre, le touche et lui cède son électricité, qui va dans le sol ; alors le pendule est de nouveau attiré par le timbre *a*, et frappe ainsi alternativement les deux timbres. En ajoutant un troisième timbre *a'*, et un second pendule, on a un double carillon. Cet instrument peut servir à faire connaître si le corps auquel il est accroché est chargé d'électricité.

Araignée de Franklin. — Une petite figure d'araignée en liége légèrement brûlé à la surface, est suspendue par un fil de soie entre deux boules, dont une est en communication avec le sol, et l'autre isolée est chargée d'électricité. L'araignée oscille entre ces deux corps ; mais comme le liége est peu conducteur, l'électricité y entre et en sort lentement, et l'araignée reste posée pendant quelque temps sur chacune des boules, avant de s'en écarter.

Appareil à grêle. Théâtre électrique. — L'appareil à grêle, imaginé par Volta, consiste en une cloche de verre (*fig.* 931), dans laquelle est suspendu un plateau métallique que l'on met en communication avec une machine électrique. La cloche repose sur un second plateau qui communique avec le sol, et sur lequel on a placé des balles de moelle de sureau. Ces petits corps sont attirés par le plateau supérieur, puis font de rapides oscillations entre les deux plateaux, prenant de l'électricité au plateau supérieur, et rentrant à l'état neutre en retombant sur le plateau inférieur. — On fait aussi l'expérience en renversant sur le plateau une cloche de verre, dont on a électrisé l'intérieur en y faisant jaillir l'électricité par une pointe. Les balles oscillent jusqu'à ce qu'elles aient enlevé presque toute l'électricité de la cloche.


Fig. 931.

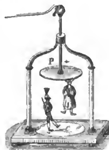


Fig. 932.

Si, entre les deux plateaux P, *c* (*fig.* 932), on place de petits personnages en moelle de sureau, ils sautent en allant de l'un à l'autre, et on a le *théâtre électrique* ou *danse des pantins*. Une aigrette de soie placée sur leur tête fait qu'ils se tiennent droits pendant leurs mouvements.

Planisphère électrique. — Un plateau *vv* (*fig.* 933) soutient, au moyen de petites colonnes de verre, une galerie métallique *cc*. Sur le plateau est collée une bande circulaire en étain qui communique par son centre avec le sol. Une boule légère en verre soufflé, *m*, est posée sur la bande d'étain et s'appuie contre la galerie *cc*. On fait communiquer cette dernière avec la machine électrique ; on voit aussitôt la boule, *m*, prendre, en roulant, un mouvement circulaire autour de l'appareil, imitant ainsi le double mouvement d'une planète autour

du soleil. La galerie *cc* cède de l'électricité aux points de la boule qui la touchent, et les repousse dans une direction qui ne lui est pas exactement normale (la boule n'étant pas une sphère parfaite) ; ils sont attirés en même temps par la bande d'étain, qui est à l'état neutre, de manière que ces points arrivent bientôt au contact de cette bande, où ils perdent leur électricité. D'autres points, pendant ce mouvement, ont touché la galerie *cc*, et le mouvement continue, la force centrifuge poussant continuellement la boule contre la galerie.

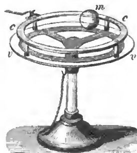


Fig. 933.

Arrosoir électrique. — Un vase métallique (*fig.* 933) porte des ajutages capillaires, par lesquels de l'eau s'échappe goutte à goutte. Si l'on suspend ce vase à la machine électrique, l'eau s'échappe de chaque ajutage en formant un jet divergent de gouttelettes fines. Cette expérience, due à Elliot, puis à Rollet et Boze, montre la répulsion des différentes parties de l'eau électrisée, les unes pour les autres. Peltier ayant enveloppé le jet d'un anneau métallique électrisé de la même manière, a vu les gouttelettes divergentes se resserrer en un filet unique. Ayant reçu le jet divergent dans une sphère métallique isolée, il l'a vu se resserrer à mesure que la sphère recevait de l'électricité des gouttes. D'après M. Carmoy, la dépense n'est pas modifiée ; ce qui montre que la cause du phénomène agit après que le liquide a quitté l'orifice.


Fig. 934.

Aldini a reconnu que quelques gouttes d'huile versées sur de l'eau électrisée se subdivisent en fines gouttelettes. Il résulte aussi d'expériences de Bohadsch, que l'électricité active sensiblement l'évaporation des liquides.

Nous citerons enfin l'expérience suivante, due à M. Charault. Un aréomètre est plongé dans un liquide qu'on électrise. On voit alors l'aréomètre monter de plusieurs centimètres, comme si le liquide avait augmenté de densité. Ce résultat est dû à la répulsion électrique du liquide ; si cette répulsion se faisait sentir sur tous les points de l'aréomètre, il n'y aurait pas d'effet produit ; mais comme elle n'existe pas de haut en bas à l'endroit où la tige sort du liquide, l'instrument est soulevé par la répulsion qui s'exerce de bas en haut sur la portion de surface qu'intercepterait la tige prolongée.

1272. Électroscopes et électromètres. — Les *électroscopes* sont de petits appareils destinés à reconnaître la présence de l'électricité, par des attractions ou des répulsions. L'*aiguille électrique* et le pendule électrique de Gray sont donc des électroscopes. Les *électromètres* doivent, de plus, mesurer les quantités d'électricité. La première tentative d'un instrument destiné à donner une

idée de la charge électrique, est due à Darcy et Le Roy. Nollet, en 1752, imagina de réunir deux fils de lin, dont il mesurait l'écart sur leur ombre, afin d'avoir une idée de la quantité d'électricité qu'ils avaient reçue. Cavallo suspendit des balles de liége à ces fils, et renferma le tout sous une cloche de verre. La *fig.* 935 représente l'électromètre sous cette forme : la cloche est traversée, à sa partie supérieure, par une tige métallique terminée en dehors par un bouton B, et à laquelle sont suspendus en dedans deux fils terminés par deux balles de moelle de sureau *m*. A la place de ces fils, Volta suspendit deux brins de paille d'herbe fine très mobiles *p*, et Bennet les remplaça par des bandes *o*, prises dans une feuille d'or, et appliquées l'une sur l'autre. Quand le bouton B reçoit de l'électricité, les balles, pailles ou feuilles d'or s'écartent, et l'on peut évaluer l'angle d'écart sur un arc divisé, gravé le plus souvent sur la cloche de verre. Deux bandes d'étain *cc'* sont collées en dedans sur les parois de la cloche ; elles sont destinées à décharger l'électromètre quand les pailles s'écartent au point de toucher ces parois. Sans cette précaution, le verre recevrait de l'électricité, qu'il garderait, parce qu'il est mauvais conducteur, ce qui gênerait les expériences que l'on voudrait faire ensuite. De plus, ces bandes d'étain réagissent pour augmenter l'angle d'écart. La partie supérieure de la cloche est garnie de gomme laque pour empêcher l'humidité de se déposer sur le verre, et l'on introduit dans l'intérieur, des fragments de chlorure de calcium ou de chaux vive, pour que l'air y soit bien sec.

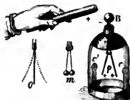


Fig. 935.

Quand l'électricité que l'on veut reconnaître, se trouve sur un corps mauvais conducteur, on ne touche pas le bouton B avec ce corps, mais on se contente de l'en approcher peu à peu. Il se fait alors une décomposition par influence dans le fluide neutre du bouton B; le fluide de même nom, que nous supposerons positif, est repoussé dans les pailles, et le fluide négatif est attiré en B. On touche ensuite le bouton avec le doigt, l'électricité positive passe dans le sol, et les pailles se rapprochent; ôtant le doigt et retirant ensuite le corps électrisé, on voit les pailles s'écarter sous l'influence du fluide négatif resté seul dans l'appareil.

L'électricité que renferme l'électromètre est de nom contraire à celle du corps qui a servi à le charger. Pour reconnaître de quelle nature est cette électricité, on approche du bouton B un corps chargé d'une électricité connue ; par exemple, un bâton de verre électrisé positivement. Si l'électromètre contient du fluide positif, ce fluide est repoussé du bouton, et les pailles divergent davantage ; si, au contraire, elles contiennent de l'électricité négative, les pailles se rapprochent, cette électricité étant attirée dans le bouton. Il faut avoir soin de n'approcher que lentement le bâton de verre ; car, dans le dernier cas, après que l'électricité des pailles a été attirée dans le bouton, il peut se faire une décom-

position de fluide neutre par influence, et l'électricité repoussée fait écarter les pailles après qu'elles se sont resserrées. Si l'on approchait trop vivement le bâton de verre, le premier mouvement des pailles pourrait n'avoir pas le temps de s'effectuer, et l'on serait induit en erreur sur la nature de l'électricité que contient l'électromètre.

1273. Des électromètres comparables. — On doit se demander si, dans les instruments dont nous venons de parler, l'angle que font les parties mobiles est proportionnel aux quantités d'électricité que contient l'instrument. Saussure a fait beaucoup d'expériences à ce sujet : il prit deux électromètres à balle de sureau, identiques dans toutes les parties; l'un d'eux étant chargé d'une certaine quantité d'électricité, il en mit le bouton en communication avec le bouton de l'autre, au moyen d'un fil métallique isolé qui les touchait en deux points semblablement situés. Il est évident que l'électricité devait se partager également entre les deux instruments, et que le premier ne devait plus contenir que la moitié du fluide qu'il possédait d'abord. De même, en ramenant le second instrument à l'état neutre, et le faisant communiquer de nouveau avec le premier, la charge de celui-ci était réduite au quart de ce qu'elle était primitivement. Saussure reconnut ainsi que les angles d'écart ne sont pas proportionnels aux charges électriques. Volta ayant remplacé les fils à balles, par des pailles, trouva que l'électromètre ainsi modifié est comparable à lui-même jusqu'à 30°, c'est-à-dire que la charge est proportionnelle à l'angle d'écart, quand on ne dépasse pas cette limite.

Nous ferons connaître plus loin des *électromètres* plus exacts, ainsi que d'autres *électroscopes*, quand nous aurons à parler des expériences dans lesquelles on en fait particulièrement usage.

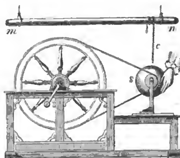


Fig. 936.

IV. Des Machines électriques.

1274. Une machine électrique consiste essentiellement en un corps frottant, un corps frotté et des conducteurs isolés sur lesquels s'accumule l'électricité. La première machine électrique a été imaginée par Otto de Guericke. Elle consistait en un globe de soufre ou de résine auquel on imprimait un rapide mouvement de rotation, et sur lequel on appuyait les mains pour exercer le frottement. Boze, en 1741, suspendit par des cordons de soie, un cylindre en fer-blanc qui recueillait l'électricité, au moyen d'une chaîne descendant près de la surface de ce globe. Winkler, vers la même époque, remplaça les mains par des coussins en cuir. La *fig.* 936 représente une machine

électrique telle qu'on l'employait encore du temps de Nollet. *s* est le globe de soufre, que l'on fait tourner au moyen d'une roue et d'une corde sans fin; *mn* est le conducteur isolé, sur lequel l'électricité passe par la chaîne c. En 1766, Ramsden remplaça le globe tournant par un plateau en verre.

1275. Machine de Ramsden. — Cette machine, la plus usitée en France, donne de l'électricité positive. Un plateau circulaire en verre (*fig.* 937), mobile autour d'un axe horizontal à manivelle *m*, est pressé de chaque côté entre deux paires de coussins élastiques, soutenus par les deux montants verticaux qui

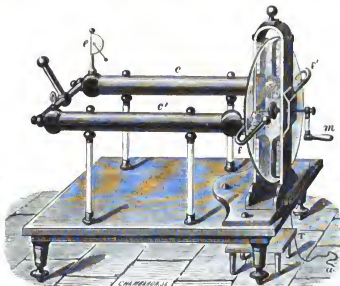


Fig. 937.

portent l'axe de rotation. Des conducteurs *ff'cc'*, ordinairement en laiton, sont soutenus par des colonnes isolantes en verre. Les parties *f*, *f'* recourbées en fer à cheval, se nomment les *mâchoires;* elles sont garnies en dedans de pointes métalliques, dont les extrémités sont très près des deux faces du plateau de verre.

Quand on fait tourner ce plateau, il se développe de l'électricité; le fluide négatif se porte sur les coussins, et de là passe dans le sol, avec lequel ils communiquent, et le fluide positif se porte sur le plateau. Quand les parties électrisées de ce dernier arrivent dans les mâchoires *f*, *f'*, elles y décomposent par influence le fluide neutre; le fluide positif est repoussé dans les conducteurs *c*, *c'*, et le fluide négatif, attiré dans les pointes, s'écoule et se précipite sur le plateau de verre, où il se combine avec l'électricité positive, pour former du fluide neutre. L'écoulement est visible dans l'obscurité, et chaque pointe est

garnie d'une petite aigrette lumineuse. On emploie des pointes, parce qu'elles ont la propriété, comme nous le verrons, de laisser sortir très facilement l'électricité. Quelquefois cependant on les remplace par de petites tiges arrondies à l'extrémité ; alors le fluide négatif passe sur le plateau, par intermittence, et sous forme d'étincelles. Le mouvement de rotation continuant, l'électricité positive du plateau se renouvelle à chaque instant.


Fig. 938.

On voit qu'il n'y a de chargés d'électricité que les deux quarts du plateau dans lesquels le mouvement se fait des coussins à la mâchoire voisine. Dans ce trajet, une partie de l'électricité du verre se perd par le contact de l'air, quand il est humide. Pour diminuer la perte, on garantit chacun des quarts dont nous venons de parler, au moyen d'un secteur formé d'une double lame de taffetas (*fig.* 938), que l'on fixe aux coussins, ou aux montants qui les soutiennent.

Limite de la charge. — La quantité d'électricité qui peut s'accumuler sur une même étendue des conducteurs de la machine électrique, n'augmente pas indéfiniment ; elle est limitée comme la décomposition par influence elle-même (1267), et aussi par les pertes qui se produisent, soit par l'air, soit par les colonnes isolantes. Ces pertes s'accroissent avec la quantité de fluide accumulée, et finissent par être égales, à chaque instant, à l'électricité fournie par le frottement. Par conséquent, plus on tournera rapidement, plus celle-ci sera grande, et plus la limite de charge sera élevée. Quand la machine fournit beaucoup d'électricité, il y a une autre circonstance qui limite la charge : c'est que l'électricité se perd dans l'air par les parties saillantes des conducteurs, malgré le soin que l'on prend d'arrondir tous les contours ; les pointes et les angles ayant la propriété de laisser écouler l'électricité (1304). De plus, ce fluide peut passer par explosion, des mâchoires aux coussins, sous forme de traits éblouissants qui longent la surface de la roue. Quand on arrive à ce résultat, c'est que la machine fonctionne très bien.

Tout ce qui augmente la déperdition diminue le maximum de charge des conducteurs. Il faut citer en première ligne l'humidité de l'air, qui agit, soit en enlevant par son contact l'électricité des conducteurs ou du plateau, soit en se déposant sur ce dernier, qui alors ne fournit que peu d'électricité. Il faut alors le sécher, en en approchant du feu ou en y appliquant des serviettes chaudes. M. Münch a remarqué qu'en faisant quelques traits avec un morceau de suif sur le plateau, on lui fait donner immédiatement beaucoup plus d'électricité. En enduisant les colonnes isolantes, quand elles ne sont pas vernies à la gomme laque, d'une couche imperceptible de la même substance, elles isolent parfaitement, même quand l'air est humide ; le suif agit ici en repoussant l'humidité de la surface du verre. Nous avons indiqué plus haut l'usage des secteurs en taffetas.

Électromètre à cadran ou de Henley. — Pour juger de la charge de la

machine électrique, on se sert de l'*électromètre de Henley*, qui se voit en *e* (*fig.* 937). Le petit pendule de cet instrument est repoussé par son support, et l'angle d'écart se mesure sur un cercle divisé, en ivoire. Quand la machine fonctionne bien, le pendule s'élève au-dessus de l'horizontale, parce qu'il subit l'action répulsive du conducteur *c*, sur lequel est fixé l'instrument.

La quantité d'électricité fournie aux conducteurs, dépend évidemment de l'étendue des surfaces frottées, c'est-à-dire de la grandeur du plateau et des coussins; elle dépend aussi de l'état de leur surface.

Des coussins. — Les coussins se font en peau de daim rembourrée avec du crin; on les enduit de différentes substances, qui constituent en réalité le corps frottant. Nous indiquerons d'abord l'or *musif* ou deutosulfure d'étain, matière friable, que l'on fait adhérer aux coussins en les enduisant d'un peu de suif. On emploie encore différents amalgames, parmi lesquels nous citerons celui de Singer, formé de 1 partie d'étain, 2 de zinc et 6 de mercure, ou 2 d'étain, 3 de zinc et 7 de mercure; celui de Cavallo, qui contient 1 partie d'étain contre 3 ou 4 de mercure, et auquel on ajoute souvent 1 de zinc; celui de Kienmayer, dans lequel il entre 1 de zinc, 1 d'étain et 2 de mercure. Ces amalgames sont pulvérulents, et s'appliquent de la même manière que l'or musif; ils produisent des effets plus intenses que ce dernier, mais moins durables. Quand la machine ne donne que de faibles résultats, il suffit souvent, pour lui rendre sa vigueur, de démonter les coussins et de les frotter l'un sur l'autre de manière à déplacer la matière adhérente. Leroy disposait les coussins de manière qu'on pût les retourner de haut en bas, et ce changement suffisait pour que la machine reprît une grande énergie.

Van-Marum a imaginé une espèce de coussin qui a été remise en faveur, assez récemment, par M. Perrault-Steiner : la peau de daim est appliquée sur une plaque de bois, et recouverte par un morceau de taffetas garni en dessous et en dessus de feuilles d'étain, par lesquelles elle est facilement débarrassée de l'électricité négative, que des bandes de métal appliquées sur les montants qui soutiennent la roue conduisent dans le sol, par l'intermédiaire d'une chaîne *a* (*fig.* 937). On recouvre cette espèce de coussin, d'un amalgame composé de mercure, zinc, étain, et d'un peu de bismuth.

Du plateau. — Le verre du plateau doit être aussi peu hygrométrique que possible. On recherche, pour cela, les anciennes glaces, qui renferment moins de potasse que les glaces modernes. Certains fabricants préfèrent le verre olivâtre des bouteilles, d'autres le cristal; souvent enfin on emploie du verre coloré en bleu par le cobalt. On augmente l'efficacité des plateaux en les faisant séjourner dans l'eau bouillante, qui agit probablement en enlevant de la potasse à la surface, par une action analogue à celle qui se produit sur les monnaies, quand on les plonge dans de l'eau acidulée, pour enlever l'alliage à la surface, et leur donner une couleur plus éclatante.

On a fait des machines avec plusieurs plateaux assemblés sur le même axe ou sur des axes différents; on a fait aussi, dernièrement, des plateaux en

gutta-percha, mais ils s'usent assez promptement. On en a construit en caoutchouc durci; dans ce cas, la machine se charge d'électricité négative. Bertholon avait imaginé une machine, qu'il appelait *inverse*, et qui se chargeait aussi d'électricité négative; les coussins étaient remplacés par des plaques de verre, et la roue de verre par un plateau en bois recouvert de chaque côté, de coussins circulaires.

La machine de Ramsden ne donne qu'une seule espèce d'électricité; on peut cependant recueillir celle qui se porte sur les coussins, en isolant les pieds de l'appareil sur des morceaux de résine; on trouve alors les coussins, les montants et la table, chargés d'électricité négative. Leroy a imaginé une disposition au moyen de laquelle on recueille les deux électricités en même temps. Les coussins sont placés en dehors des montants qui portent l'axe de la roue, et soutenus par une colonne isolante. Dujardin a construit une machine disposée d'une manière analogue [1]; les coussins sont placés par paire aux extrémités d'un diamètre horizontal, et les deux mâchoires à pointes du conducteur, aux extrémités d'un diamètre vertical. Cette machine ressemble, par son aspect, à celle que nous allons décrire.

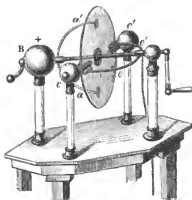


Fig. 939.

1276. Machine de Van-Marum. — Cette machine donne l'une ou l'autre électricité, à volonté. Un plateau de verre (*fig.* 939), dont l'axe est soutenu par deux colonnes isolantes, est pressé aux extrémités de son diamètre horizontal, par des coussins portés par des boules isolées *c*, *c'*. Deux arcs métalliques *oo'*, *aa'*, munis de manchons que traverse l'axe, peuvent se placer, soit dans un plan vertical, soit dans un plan horizontal, et y rester pendant que le plateau tourne. Ces arcs sont terminés par de petits cylindres parallèles au plateau, et garnis de pointes. L'arc *oo'* est mis en communication avec le sol au moyen d'une chaîne. — Si l'arc *aa'* est vertical, et l'arc *oo'* horizontal et en contact avec les coussins, la machine fonctionne comme celle de Ramsden, et la sphère B se charge d'électricité positive. Si, au contraire, on place l'arc *oo'* verticalement, et l'arc *aa'* horizontalement, les branches appuyées sur les coussins, la sphère B recueille l'électricité négative des coussins, et l'électricité positive dont se charge l'arc *oo'* par suite d'une décomposition par influence,

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. IX, p. 111.

passe dans le sol. En supprimant la chaîne, on aurait sur l'arc *oo'* du fluide positif, en même temps que du fluide négatif en B.

1277. Machine de Nairne. — Cette machine, usitée surtout en Angleterre, donne, en même temps, les deux électricités. Elle se compose d'un cylindre,

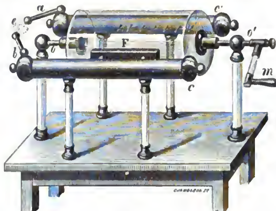


Fig. 940.

en verre que l'on fait tourner autour de son axe *oo'* (*fig.* 940), au moyen de la manivelle *m*. De part et d'autre de ce cylindre, sont deux conducteurs isolés *c* et *c'*. L'un, *c*, porte un coussin F, pressé par un ressort contre le cylindre de verre; l'autre, *c'*, est garni de pointes dirigées vers ce cylindre. L'électricité négative du coussin est recueillie par le conducteur *c*, tandis que le conducteur *c'* se charge par influence de fluide positif. Quand on n'a besoin que d'une seule espèce d'électricité, on fait communiquer avec le sol, le conducteur sur lequel se porte l'autre, afin d'augmenter la décomposition produite par le frottement.



Fig. 941.

Pompe électrique. — Ce petit appareil (*fig.* 941), notablement perfectionné par M. Riess, a l'avantage d'être très portatif. Le frottement est produit par un piston *p* en liége garni de drap et enduit d'amalgame, et mis en mouvement dans un tube de verre, par l'intermédiaire de la tige *t*, dont la partie *v* est en verre. L'électricité négative du piston est recueillie par la virole *a*. L'électricité positive du verre décompose par influence le fluide neutre d'un plateau garni de pointes, *c*, fixé au piston, dont il est isolé, et communiquant par le ressort *r*, avec la virole *b*, qui est électrisée positivement. On tient la pompe en *a* ou en *b*, suivant qu'on veut recueillir l'électricité positive ou l'électricité négative.

1278 Expériences diverses. — On fait avec la machine électrique différentes expériences dont nous avons déjà cité un certain nombre. Parmi les

effets les plus remarquables de cet appareil il faut citer l'*étincelle électrique*, qui se produit quand on en approche un corps conducteur en communication avec le sol. C'est à la longueur et à la grosseur du trait lumineux, que l'on juge de la puissance et du bon état de la machine.

Tabouret isolant. — On peut tirer des étincelles du corps d'une personne communiquant avec le conducteur de la machine électrique, et montée sur un *tabouret isolant*, T (*fig.* 937), qui n'est autre chose qu'une petite table à pieds de verre. On peut remplacer les pieds de verre par des morceaux de bois léger desséchés au four, et ayant séjourné dans de l'huile bouillante. Nollet et Brisson ont employé des sabots préparés de la même manière. La personne électrisée n'éprouve aucune sensation particulière, si ce n'est aux cheveux, qui se dressent par leur répulsion mutuelle. Cet effet augmente quand un observateur non isolé approche la main, dans laquelle il se fait une décomposition par influence.

Conducteurs secondaires. — La quantité totale d'électricité que reçoivent les conducteurs dépend, toutes choses égales d'ailleurs, de l'étendue de leur surface. Quand on veut rassembler beaucoup d'électricité, on les fait communiquer avec d'autres conducteurs suspendus par des cordons de soie, et que l'on nomme *conducteurs secondaires*. L'expérience a prouvé que des cylindres étroits et très longs recueillent plus d'électricité, à égalité de surface, que les cylindres plus gros. Volta employait de petits cylindres de $13^{mm},5$ de diamètre, et de $2^{m},60$ de longueur; deux de ces cylindres étaient suspendus parallèlement, à des cordons de soie, et les autres étaient posés transversalement sur ceux-ci, de manière à ne pas se toucher.

Les plus fortes machines sont à plateau. Nous citerons celle du musée Teyler à Harlem, construite en 1785 par Cuthberston; elle est dans le système de Van-Marum, et porte deux plateaux parallèles, de $1^{m},62$ de diamètre, qui exigent quatre hommes pour être mis en mouvement; elle donne des étincelles de plus de $\frac{1}{2}$ centimètre de diamètre et 65^{cm} de longueur, produisant une véritable détonation. Un pendule électrique est dévié, à une distance de plus de 12 mètres. Cette machine donne d'autres résultats intenses, que nous aurons occasion de citer. La grande machine du Conservatoire des Arts-et-Métiers de Paris donne des résultats aussi remarquables; le diamètre du plateau est de $1^{m},85$. Enfin, la plus grande machine qui existe est celle de l'Institut polytechnique de Londres; le plateau a $2^{m},27$ de diamètre; il est mis en mouvement par une machine à vapeur. Les effets de ce puissant appareil sont cependant bien dépassés par ceux de la machine de nature toute spéciale qui nous reste à décrire.

1279. Machine hydro-électrique. — L'électricité que fournit cette machine est due au frottement exercé contre les parois de l'ajutage de sortie, par des gouttelettes d'eau entraînées dans un jet de vapeur. Nous verrons plus tard comment M. Faraday a démontré que la présence de ces gouttelettes est nécessaire pour qu'il y ait dégagement d'électricité. M. Armstrong, qui s'est

occupé, un des premiers, de ce phénomène, a imaginé d'en tirer parti pour construire une machine électrique. La *fig.* 942 représente un appareil de cette espèce, construit par M. Rumhkorff. C*p* est une chaudière cylindrique à foyer intérieur, disposée comme celle des locomotives. *s* est la soupape de sûreté, *n* le tube à niveau, *p* la porte du foyer, et C la cheminée. Cette chaudière est isolée par des colonnes en verre. Un robinet *r* sert à donner issue à la vapeur, qui passe d'abord dans un réservoir cylindrique horizontal K, d'où elle se rend, par des tubes, aux ajutages *a*. On voit en V la coupe d'un de ces ajutages ; le jet de vapeur se brise contre la lame *o*, puis traverse un canal pratiqué dans un tronc de cône en buis *b*, maintenu par le couvercle à vis *n*. Pour que la vapeur soit mêlée de gouttelettes d'eau, les tubes traversent une boîte *c*, dans laquelle ils sont continuellement mouillés par des mèches de coton plongeant dans une couche d'eau ; ce qui fait que la vapeur se condense en partie, avant d'arriver aux ajutages. Le tube *ct* conduit dans la cheminée les vapeurs qui se dégagent de la boîte réfrigérante *c*.

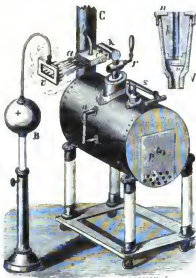


Fig. 942.

Le frottement dans le canal de l'ajutage, des gouttelettes d'eau emportées par la vapeur, dégage de l'électricité ; le fluide négatif se porte sur la chaudière isolée, et le fluide positif est emporté par la vapeur. Pour recueillir ce fluide positif, on présente aux jets de vapeur, un cadre *v* garni de pointes, et fixé sur un globe isolé B. On met les pointes très près des ajutages quand on veut beaucoup d'électricité ; on les éloigne à 10 ou 12^{cm} quand on veut obtenir, non une grande quantité d'électricité, mais une forte *tension*, c'est-à-dire de l'électricité capable de donner de longues étincelles. Quand on n'a besoin que d'une seule espèce de fluide, on fait communiquer avec le sol le corps sur lequel se porte l'autre ; sans cette précaution, une partie des deux fluides se recombinerait à travers le jet de vapeur. La quantité d'électricité est d'autant plus grande que la pression de la vapeur est plus forte ; on lui donne ordinairement 5 à 6 atmosphères.

Les machines hydro-électriques produisent des effets étonnants. Une petite chaudière contenant seulement 30 ou 40 litres d'eau, peut donner, par seconde, 4 ou 5 étincelles de 10 à 15^{cm} de longueur. La machine de l'Institut polytechnique de Londres, dont la chaudière, d'environ 2 mètres de longueur, est munie

de 46 jets, donne des étincelles de 60cm de longueur; et fournit environ 45 fois plus d'électricité que la grande machine à plateau du même établissement. La machine hydro-électrique de la Faculté des sciences de Paris porte 80 becs; elle donne des étincelles de plusieurs décimètres de longueur et de plusieurs centimètres d'épaisseur. Ces étincelles se succèdent si rapidement, qu'on ne peut les compter. Nous verrons d'autres effets des machines hydro-électriques. Malgré la grande quantité d'électricité qu'elles fournissent, elles ne peuvent être employées habituellement : les ajutages s'usent rapidement, la chaudière doit être lavée à l'eau de potasse avant de s'en servir, et il faut un temps assez long pour obtenir la vapeur avec la tension convenable.

1280. Electrophore. — Dans les laboratoires de chimie, on a souvent besoin d'étincelles électriques pour enflammer des mélanges gazeux. A une machine électrique, qui serait trop embarrassante, on préfère l'*électrophore*, dû à Volta, qui fut conduit à l'imaginer par des expériences de Beccaria, Æpinus et Wilke; ce qui fait que ce dernier passe quelquefois pour l'inventeur.

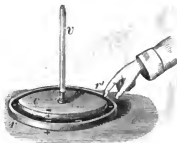


Fig. 943.

L'électrophore consiste en un gâteau de résine coulé dans un moule en bois ou en métal *rr'* (*fig.* 943), sur lequel on pose un plateau *c* en métal, ou en bois recouvert d'une feuille d'étain, et muni d'un manche de verre *v*. On commence par électriser le gâteau de résine, en le frottant avec une peau de chat. On pose ensuite le plateau *c* sur la résine, qu'il ne touche que par un très petit nombre de points; de sorte qu'on peut regarder les deux surfaces comme séparées par une couche d'air. Il se fait donc alors une décomposition par influence dans le fluide neutre du plateau *c*, l'électricité positive est attirée du côté de la résine, et la négative est repoussée à la partie supérieure, où l'on pourrait en reconnaître la présence au moyen d'un électromètre de Henley. Si l'on enlève le plateau *c* par son manche de verre, tout y rentre à l'état neutre. Mais si auparavant on fait passer le fluide négatif dans le sol, en posant le doigt sur le plateau, quand ensuite, ayant enlevé le doigt, on soulève le plateau, on le trouve chargé d'électricité positive, et l'on peut en tirer une étincelle. On pourra répéter cette opération un très grand nombre de fois, parce que l'électricité de la résine ne passe pas sur le plateau *c* (si ce n'est la très petite quantité qui se trouve aux points où il y a contact); l'instrument peut donc conserver son électricité pendant longtemps quand on le renferme dans un espace dont l'air est bien sec, et c'est de là que vient le nom d'*électrophore*.

La théorie de l'électrophore, telle que nous venons de l'exposer, n'est pas complète, car elle n'explique pas certains faits, parmi lesquels nous citerons

les suivants : 1° l'électrophore ne fonctionne plus, ou du moins ne donne que de très faibles résultats quand, la résine étant électrisée, le moule ne communique pas avec le sol ; 2° quand on isole le moule, on peut en tirer une étincelle, après avoir touché le plateau supérieur, et une autre après avoir ensuite enlevé ce plateau [1]. De plus, le moule, surtout quand il est métallique, réagit sur la surface supérieure de la résine, de manière à y permettre un plus grand développement d'électricité ; il joue ici le rôle des armatures vis-à-vis des aimants.

Il y a évidemment une action par influence exercée sur le moule par l'électricité de la surface de la résine. On expliquait ce qui se passe dans ce cas de la manière suivante : le fluide négatif de la partie supérieure de la résine décompose par influence le fluide neutre du moule, repousse dans le sol le fluide négatif, et retient le fluide positif. Ce dernier ne contrebalance qu'en partie l'action de la résine sur le plateau supérieur, à cause de sa plus grande distance à ce plateau. — Mais il est évident qu'il devrait alors y avoir avantage à conserver dans le moule, le fluide repoussé, c'est-à-dire à isoler l'appareil. Or, c'est le contraire qui a lieu ; de plus, l'électricité conservée dans le moule devrait être positive. Or, M. Buff a fait voir qu'elle est, au contraire, négative [2]. Pour cela, il remplaça le bouton d'un électromètre à feuilles d'or par une plaque métallique, appliqua dessus un disque de résine, qu'il électrisa par frottement, pendant qu'il faisait communiquer le plateau de l'électromètre avec le sol ; il posa ensuite sur la résine un plateau à manche de verre, pour former un électrophore ; le toucha avec le doigt en même temps que la plaque inférieure ; puis, ayant enlevé la résine avec la plaque superposée, il vit les feuilles d'or s'écarter et indiquer de l'électricité *négative*.



Fig. 944.

Pour expliquer ces faits, il faut remarquer que lorsqu'on électrise négativement un plateau de résine sur l'une de ses faces, il s'électrise positivement sur la face opposée, par une action moléculaire particulière, sur laquelle nous aurons à revenir plus tard. L'électricité neutre du moule *cd* (*fig.* 944) est alors décomposée par l'influence du fluide positif de la face inférieure de la résine [3] : l'électricité négative est attirée vers cette face et détruit son fluide positif, ou du moins contrebalance les actions qu'il pourrait exercer à distance ; l'électricité positive est repoussée dans le sol. Si maintenant on installe le plateau supérieur *ab*, on voit que la décomposition que tend à y produire l'électricité de la surface supérieure de la résine n'est plus contrariée par

[1] *Journal de physique*, 1776 (1), p. 501.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. VI, p. 104.

[3] Cette décomposition se fait au contact, et non à distance ; mais il ne faut pas oublier que la résine est un corps isolant.

une action contraire du moule inférieur. De plus, l'électricité positive du plateau *ab*, réagissant sur *cd*, plus que ne le fait son fluide négatif plus éloigné, y détermine une nouvelle décomposition; et, si le plateau *cd* est isolé, on pourra en tirer une étincelle due à du fluide positif. Si alors on touche avec le doigt le plateau *ab*, son fluide négatif s'échappera, et son fluide positif restant seul, une nouvelle décomposition se fera en *cd*; du fluide *positif* sera repoussé, et l'on pourra tirer une nouvelle étincelle[1]. Enfin, quand, après avoir ainsi fait disparaître le fluide positif libre de *cd*, on enlèvera le plateau *ab* chargé d'électricité positive, le fluide négatif de *cd*, qui était retenu par l'attraction de l'électricité positive de *ab*, deviendra libre, et l'on pourra tirer sur *cd* une nouvelle étincelle, due cette fois à du fluide négatif. Si le moule *cd* était resté isolé et n'avait subi aucun contact à partir du moment où l'on a appliqué le plateau *ab*, on voit que ce dernier ne se serait que très peu chargé; le fluide positif qui serait resté en *cd* contrebalançant en partie l'action du fluide négatif de la partie supérieure de la résine. Le même inconvénient serait produit par l'électricité de la face inférieure de la résine, si elle ne s'appuyait pas sur un corps conducteur non isolé. Toutes ces déductions se vérifient facilement avec un électrophore à moule métallique, dont la couche de résine n'est pas trop épaisse.

Toutes les substances isolantes sont propres à fabriquer des électrophores; on emploie le plus souvent la résine, ou des mélanges moins cassants. Robert de Liége se servait du premier des mélanges suivants; le troisième est le plus fréquemment employé.

Poix	1	Colophane	200gr	Colophane	250gr
Térébenthine de Venise	2	Térébenth. de Venise	25	Térébenth. de Venise	62
Cire	2				
Résine	3	Gomme laque	»	Gomme laque	500
Soufre concassé	4	Suif	15	Suif	15
Laque en tabl. id	6				

On fait, depuis quelque temps, des électrophores en caoutchouc, qui donnent d'excellents résultats. Un des plus grands électrophores qui existent est celui qui a été exécuté à Gœttingue, par Kleindworth. Le gâteau de résine avait $2^m,25$ de diamètre, et le plateau métallique, 2 mètres. On en tirait d'énormes étincelles, soit en chargeant le plateau, soit en le déchargeant.

[1] En touchant en même temps les surfaces *ab*, *cd*, on éprouve une petite commotion, comme dans la décharge du condensateur, dont nous parlerons plus loin.

§ 2. — DE LA LUMIÈRE ÉLECTRIQUE.

I. De l'étincelle électrique et des circonstances qui l'accompagnent.

1281. Nous avons eu occasion de citer plusieurs circonstances où le dégagement de l'électricité est accompagné d'effets lumineux. Nous allons nous occuper maintenant des conditions de ce phénomène. Disons d'abord que l'électricité ne produit de lumière que lorsqu'elle est en mouvement. Tant qu'elle est en équilibre sur les corps, tant qu'elle reste *électricité statique*, elle ne donne aucune apparence lumineuse. Mais si elle se déplace, par exemple quand elle s'échappe par une pointe ; quand elle s'écoule dans le sol en grande quantité, par un conducteur à petite section ; quand elle s'élance entre deux corps, elle peut donner une lumière plus ou moins vive. L'*étincelle* nous présente la lumière électrique dans son plus vif éclat. Nous allons d'abord nous occuper de ce cas remarquable.

Cause de l'étincelle électrique. — L'étincelle électrique est le résultat de la combinaison des électricités à travers un milieu mauvais conducteur, qui est ordinairement l'air. Pour le prouver, on peut se servir de la machine de Nairne (*fig.* 940). Cette machine porte deux pièces mobiles *a* et *b*, dont on peut plus ou moins rapprocher les extrémités. Quand la distance est assez petite, et les charges assez fortes sur les deux conducteurs, qui sont électrisés d'une manière opposée, l'attraction mutuelle des deux fluides surmonte la résistance de l'air, ils se précipitent l'un vers l'autre par intermittences, en formant de vives étincelles, *e*, accompagnées de petites explosions.

On produit ordinairement l'étincelle, en approchant d'un conducteur électrisé, un autre corps conducteur. Il est facile de voir que l'étincelle est encore due ici à la combinaison des deux fluides. Il y a deux cas à examiner : le corps qu'on présente communique avec le sol, ou bien il est isolé.

1° Si le corps que l'on approche communique avec le sol, son électricité neutre est décomposée par influence : le fluide de même nom est repoussé dans le sol, et le fluide de nom contraire est attiré. Quand la distance est assez petite, les deux fluides en présence se précipitent l'un vers l'autre à travers l'air, en produisant l'étincelle. Cette étincelle est d'autant plus longue que le conducteur électrisé est plus fortement chargé, et aussi, qu'il a plus d'étendue. Il semblerait que l'étendue ne devrait avoir d'influence que sur les quantités d'électricité qui se combinent, ou sur la grosseur de l'étincelle. Mais il faut remarquer que l'électricité du conducteur se porte vers le point dont on approche le corps, en obéissant à l'attraction du fluide contraire développé par influence dans ce dernier. Or, plus il y aura d'électricité sur le conducteur, d'après son étendue, plus la quantité qui s'accumulera ainsi entre les points en

présence sera grande et agira fortement pour vaincre la résistance de l'air. C'est pourquoi une machine munie de conducteurs secondaires donne des étincelles, non seulement plus grosses, mais encore plus longues que lorsqu'elle est réduite à ses conducteurs ordinaires.

2° Quand le corps que l'on approche du conducteur électrisé est isolé, l'étincelle ne part qu'à une faible distance, et le corps reste chargé d'électricité de même nom que celle du conducteur. Supposons ce dernier chargé de fluide positif : la décomposition par influence se fait sur le corps isolé qu'on en approche ; mais le fluide positif repoussé restant sur le corps, restreint la décomposition par influence, puis agissant par répulsion sur le fluide du corps électrisé, empêche ce fluide de s'accumuler au point le plus rapproché, et s'oppose à sa tendance à vaincre la résistance de l'air. Quand l'étincelle aura jailli, l'électricité repoussée se retrouvera sur le corps, en quantité précisément égale à celle qui aura disparu sur le conducteur électrisé, puisque les deux fluides séparés par influence sont toujours en quantité équivalente. C'est ce qui avait fait admettre par Franklin que l'étincelle était le résultat du passage de l'électricité d'un corps sur un autre.

L'étincelle part à une distance d'autant plus grande que le corps isolé qu'on lui présente est plus volumineux. On conçoit, en effet, que le fluide repoussé étant alors plus éloigné du conducteur électrisé, contrarie moins l'approche du fluide de ce dernier. De plus, il y a une plus grande quantité de fluide décomposé.

Quand le corps électrisé est mauvais conducteur, l'étincelle est très petite, parce que le fluide de ce corps ne peut se transporter que des points très voisins de celui qui est touché. Si le corps qu'on approche d'un conducteur électrisé est mauvais conducteur, la décomposition par influence ne peut s'y produire, et l'on n'obtient qu'une étincelle excessivement petite.

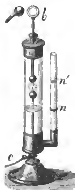


Fig. 945.

1282. Bruit de l'étincelle. — La petite explosion qui accompagne l'étincelle, s'explique par la commotion brusque qu'éprouve l'air pendant le conflit des deux fluides, commotion prouvée par diverses expériences. Kinnersley, qui l'a le premier mise en évidence, a imaginé un petit appareil destiné à en apprécier jusqu'à un certain point l'intensité.

Thermomètre de Kinnersley. — Un gros tube (*fig.* 945), complètement fermé, communique par le bas avec un tube plus étroit *nn'* ouvert par le haut ; il y a de l'eau dans la partie inférieure de l'appareil. Quand on fait jaillir l'étincelle entre les deux boules qui sont dans le gros tube, le liquide est brusquement soulevé de *n* en *n'* par la secousse produite dans l'air, et redescend aussitôt. Quand l'étincelle est forte, le liquide peut jaillir hors du tube *nn'*. Le nom de thermomètre, donné à cet instrument, vient de ce qu'il fait voir que le passage de l'étincelle est accom-

pagné d'une élévation de température, car le liquide ne retombe pas au premier moment exactement au niveau *n*; ce qui montre que l'air a été dilaté par la chaleur.

Mortier électrique. — L'expansion de l'air logé en *o* (*fig.* 946) lance la petite balle placée au-dessus, quand on fait jaillir l'étincelle entre les deux tiges métalliques qui traversent les parois du petit mortier en ivoire. En mettant en *o* une petite goutte d'éther, l'action est encore plus vive.



Fig. 946.

1283. Étincelle à travers les liquides et les solides. — deux tiges isolées *a* et *b* (*fig.* 947) sont entourées de gomme laque dans les parties qui plongent dans un liquide mauvais conducteur, excepté aux extrémités. L'une est mise en communication avec le sol, l'autre avec une forte machine électrique. Au moment où part l'étincelle, le liquide est projeté au loin, et quand le vase est rempli et complétement fermé, il peut être brisé; le liquide éprouve donc, comme l'air, une violente commotion.



Fig. 947.

L'étincelle peut aussi jaillir à travers les corps solides isolants; ces corps sont alors percés d'un trou, d'autant plus grand que les quantités de fluides qui se combinent sont plus considérables. Mais, pour vaincre la résistance des solides, même quand ils sont en lames minces, il faut de trés fortes charges; nous verrons plus tard comment on peut se les procurer. Nous étudierons aussi l'influence sur la distance à laquelle peut partir l'étincelle, de la charge électrique, de la nature du milieu interposé, et de sa pression quand il est gazeux.

1284. De la forme de l'étincelle. — On n'a étudié la forme de l'étincelle que dans les gaz : cette forme dépend de la longueur. Dans l'air, l'étincelle est rectiligne quand elle est suffisamment courte. On voit (*fig.* 948) quelques-uns des aspects qu'elle présente alors; les parties légérement ombrées sont d'un éclat plus faible que les autres et d'une teinte violette. Quand la distance dépasse 5 ou 6 centimétres, l'éclat est tellement vif qu'on ne distingue plus de différences de teintes, et le trait lumineux commence à présenter des sinuosités. Quand la longueur est plus grande encore, l'étincelle est trés irréguliére : tantôt c'est une courbe brillante très sinueuse *ab* (*fig.* 949),

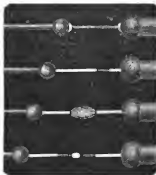


Fig. 948.

laissant échapper de fines ramifications dans diverses directions ; tantôt elle présente la forme d'un zig-zag à angles aigus. Cette dernière forme, plus rare que l'autre, se manifeste particulièrement quand les charges sont très fortes.



Fig. 949.

Il arrive aussi, parfois, que l'étincelle se divise en plusieurs branches, quand elle est très longue.

La forme irrégulière de l'étincelle est assez difficile à expliquer. On l'a attribuée à la résistance de l'air qui, refoulé brusquement par l'impétuosité du fluide, est comprimé dans le sens où il s'élance, de manière à offrir plus de résistance ; ce qui force l'électricité à changer de direction. On a aussi invoqué le défaut d'homogénéité de l'air, et la présence de parcelles étrangères en suspension. Pour venir à l'appui de ces explications, on fait l'expérience suivante.

Œuf électrique. — Un vase en verre de forme ovale (*fig.* 950), muni d'un robinet par lequel on peut extraire l'air, porte deux tiges métalliques terminées dans l'intérieur par des boules, et dont une traverse une boîte à cuir qui permet de l'enfoncer plus ou moins. On fait communiquer une des tiges avec une machine électrique, et l'autre avec le sol, et l'on voit des étincelles sinueuses jaillir entre les deux boules. Si l'on raréfie un peu l'air, les étincelles sont moins sinueuses et peuvent s'élancer à une plus grande distance.


Fig. 950.



Fig. 951.

Enfin, quand la pression n'est plus que de quelques millimètres, l'électricité passe d'une manière continue entre les deux boules, en formant un sphéroïde lumineux, connu sous le nom d'*œuf électrique* ou d'*œuf philosophique*, noms que l'on donne aussi à l'appareil. L'ovale lumineux est d'autant plus renflé que l'air est plus raréfié, et en même temps d'un éclat d'autant plus faible, surtout dans la partie moyenne, où il présente une teinte violette.

Quand il se trouve entre deux conducteurs entre lesquels on fait partir l'étincelle, une lame isolante, l'étincelle la suit et peut jaillir à une bien plus grande distance. Elle peut aussi contourner une lame de verre et en franchir

le bord, comme on le voit en *bca* (*fig.* 951), ou même se détourner pour venir en longer la surface, comme on le voit en A.

1285. Couleur de l'étincelle électrique. — M. Faraday a reconnu que l'étincelle électrique présente des couleurs différentes dans les divers gaz. Dans l'air, l'oxygène, l'acide chlorhydrique sec, l'étincelle est blanche avec une légère nuance bleuâtre, surtout dans l'air; dans l'azote, elle est bleue ou pourpre, et fait entendre un son remarquable; dans l'hydrogène, la couleur est cramoisie, et disparaît quand on raréfie ce gaz; dans l'acide carbonique, la couleur est verte et la forme très irrégulière; dans l'oxyde de carbone, elle est tantôt rouge et tantôt verte; dans le chlore, elle est verte. L'œuf électrique (*fig.* 950) peut servir à ces sortes d'expériences; on y introduit successivement, après avoir fait le vide, les gaz qui n'attaquent pas les métaux. On peut aussi, d'un seul coup d'œil, comparer les couleurs de l'étincelle, au moyen de l'appareil (*fig.* 952), imaginé par M. E. Becquerel. Les tubes *a*, *a' a"*, ont été fermés à la lampe, après avoir été remplis de divers gaz. Chacun d'eux est muni de deux bouts de fil de platine *c*, *n*, *n*, traversant le verre, auxquels ils sont scellés, et dont les extrémités intérieures sont, dans tous, également espacées. Les fils de platine sont réunis en *n*, *n*. Si l'on fait ensuite communiquer le fil *c* avec le sol, et le fil *b* avec une boule sur laquelle on fait jaillir des étincelles électriques, on voit en même temps de semblables étincelles se produire dans chaque tube, et l'on distingue leurs différentes couleurs. M. E. Becquerel a remarqué que la lumière est d'autant plus blanche que la densité propre du gaz est plus grande.

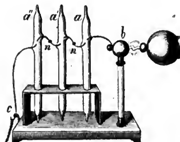


Fig. 952.

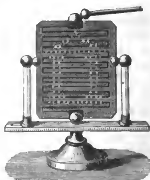
1286. Jeux de l'étincelle électrique. — On trouve dans les cabinets de physique une foule d'appareils disposés de manière à multiplier l'étincelle, et à produire des effets variés. Le principe de tous ces appareils est le même : on colle, en séries, sur du verre, de petits morceaux de feuille d'étain *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, (*fig.* 953), laissant entre eux un petit espace. Si l'on fait communiquer l'extrémité *a* de la série, avec une machine électrique, et l'autre extrémité avec le sol, l'électricité positive de la machine, arrivée en *a*, décompose par influence le fluide neutre de *b*, l'électricité positive provenant de cette décomposition agit de même sur *c*, et ainsi de suite jusqu'au dernier morceau d'étain, dont le fluide positif passe dans le sol. Dès que la charge est assez forte en *a*, l'étincelle jaillit entre *a* et *b*. Elle se produit en même temps entre *b* et *c* parce que le fluide



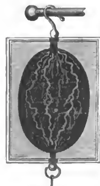
Fig. 953.

négatif de *b* étant détruit, son fluide positif se porte subitement vers *c*, et y détermine une nouvelle décomposition de fluide neutre, et l'étincelle part. La destruction du fluide négatif, qui en résulte sur *c*, détermine de même l'explosion entre *c* et *d*; et ainsi de suite de proche en proche. Ce mouvement se fait avec une telle rapidité, que les étincelles apparaissent au même instant dans tous les intervalles. — Au lieu de petites lames collées sur du verre, on emploie quelquefois des globules métalliques enfilés dans un brin de soie, et séparés par des nœuds.

Fig. 954.


Fig. 955.

Tubes et carreaux étincelants. — Quand les morceaux d'étain sont collés sur des tubes de verre, on a les *tubes étincelants* (*fig.* 954). Quand ils sont collés sur des lames de verre, on a les *carreanx* ou *tableaux étincelants*. L'abbé Bertholon a surtout varié ces sortes d'appareils : quand il voulait former un dessin dont les lignes se coupaient, il en mettait une partie d'un côté de la lame de verre, et l'autre, du côté opposé. Depuis, on a imaginé une disposition qui permet de former les dessins les plus compliqués sans avoir besoin de se préoccuper de l'entrecroisement des lignes. On colle sur la lame de verre (*fig.* 955) une bande d'étain trés étroite, allant d'un côté à l'autre, et formant une ligne continue, dont une des extrémités communique avec le sol par le pied de l'instrument, et l'autre aboutit à une sphère placée à la partie supérieure ; et l'on pratique sur cette bande des solutions de continuité, formant un dessin. Si l'on fait arriver de l'électricité par la boule supérieure, il se produit une étincelle à chaque solution de continuité. Plus les parties paralléles sont étroites et rapprochées, plus le dessin peut comporter de petits détails.


Fig. 956.

Carreau magique. — On étend sur une lame de verre, une couche d'eau épaissie par de la gomme, et l'on y projette de la limaille métallique, dont les grains restent collés après la dessication, de manière à imiter l'aventurine. On fait communiquer l'une des extrémités du carreau ainsi préparé, avec le sol, et l'autre avec une machine électrique, et l'on voit aussitôt (*fig.* 956) des serpenteaux lumineux circuler à travers les grains métalliques, les uns trés brillants et allant d'une extrémité à l'autre, les autres beaucoup plus fins et interrompus après

un trajet assez court. Ces serpenteaux changent à chaque instant de figure et de position. On peut les regarder comme formés par des séries de petites étincelles qui jaillissent entre les grains métalliques, comme dans les carreaux étincelants, et qui sont tellement rapprochées qu'elles semblent former des lignes continues. Ces jeux de lumière ont une certaine importance scientifique; nous verrons qu'ils servent de base à l'explication de certains phénomènes.

II. Lumière dans l'écoulement continu de l'électricité.

1287. Au lieu de se produire par explosion, comme dans l'étincelle, la lumière électrique peut être continue, comme nous en avons vu des exemples dans l'œuf électrique et dans les carreaux magiques.

Aigrette. — Quand l'électricité s'échappe dans l'air, d'une partie saillante d'un conducteur fortement électrisé *positivement*, elle présente l'apparence d'une aigrette lumineuse divergente, dont l'éclat, assez vif au point de départ, où se trouve souvent une sorte de pédicule rectiligne et de teinte violette, va en diminuant à mesure qu'elle s'épanouit. Cette aigrette est composée de séries de petits points brillants, ramifiées, d'autant plus faciles à distinguer qu'elle est plus grande (*fig.* 957). On entend en même temps une sorte de pétillement. Pour observer ce phénomène, on place sur le conducteur d'une forte machine électrique, une petite boule métallique; plus la boule est petite, plus l'aigrette qui s'en échappe est faible, ainsi que le bruit qui l'accompagne. Ce bruit est en même temps plus continu, il forme un son plus aigu, et les points brillants de l'aigrette sont moins distincts. Si l'on remplace la boule par un petit cylindre arrondi, implanté sur le conducteur, l'aigrette diminue encore; quand enfin on se sert d'une pointe, l'aigrette n'est plus qu'une lueur continue, et l'on n'entend plus aucun bruit.



Fig. 957.

Faraday explique ces diverses apparences en admettant que l'aigrette est composée d'une quantité innombrable de petites étincelles qui jaillissent entre les particules de l'air, comme entre les grains des carreaux magiques. Le pétillement est produit par ces petites décharges. Au point de départ, la lumière est plus vive, parce que les molécules d'air, qui reçoivent toute l'influence électrique, sont moins nombreuses qu'à une plus grande distance de la boule électrisée. Pour rendre l'aigrette plus sensible, il suffit, comme on pouvait le prévoir, d'approcher du point d'où elle part, un corps bon conducteur non isolé. Ce corps se charge par influence d'une électricité contraire à celle de la machine, et agit dans le même sens que cette dernière pour *polariser* les particules de l'air; aussi l'aigrette prend-elle alors des dimensions et un éclat beaucoup plus grands, en se dirigeant du côté du corps que l'on approche

(*fig.* 958). Si l'aigrette diminue quand la boule est plus petite, ou quand elle est remplacée par une pointe, c'est que l'électricité s'échappe plus facilement du conducteur, dont la charge ne peut plus être aussi forte; alors les décompositions particulaires ne peuvent se faire qu'entre les molécules les plus proches.

Weatstone a démontré, par une expérience ingénieuse, que l'aigrette est discontinue, et que les décharges moléculaires se transmettent successivement, à cause de la mauvaise conductibilité de l'air. Voici le principe de sa méthode, qu'il a appliquée, plus tard, à la mesure de la vitesse de l'électricité : quand on fait tourner un miroir en présence d'un point lumineux, les rayons réfléchis se déplacent d'une quantité angulaire *double* de celle dont tourne le miroir pendant le même temps; on voit donc marcher l'image du point lumineux dans le miroir. Si ce point n'éclaire que pendant un temps très court, son image parcourra un petit arc d'autant plus étendu que ce temps sera plus long, et que le miroir tournera plus vite. Si plusieurs points brillent les uns après les autres, à chacun d'eux correspondra un arc lumineux, et ces arcs seront plus ou moins en avant les uns des autres. Or, quand on fait tourner le miroir en face d'une aigrette, avec une vitesse de 6 à 800 tours par seconde, on voit dans le miroir une foule de petits traits lumineux, allongés dans le sens du mouvement et se dépassant les uns les autres; ce qui prouve la discontinuité de l'aigrette, et en même temps la durée appréciable de chaque étincelle moléculaire.



Fig. 958.

Différence entre les aigrettes positive et négative. — On peut dire, en général, que l'aigrette formée par l'électricité positive est plus belle que celle que donne le fluide négatif. C'est surtout aux pointes que la différence devient sensible; tandis que l'électricité positive forme une gerbe épanouie, le fluide négatif ne donne qu'un point lumineux ou une étoile (*fig.* 959). Quand on raréfie l'air, la différence est moins marquée. Elle n'est pas la même dans divers gaz : ainsi, elle est plus prononcée dans l'azote que dans l'air. Dans l'hydrogène et dans l'oxygène, l'aigrette positive diminue, tandis que la négative reste la même. Dans l'oxyde de carbone et dans l'acide carbonique, les deux aigrettes sont à peu près les mêmes et peu brillantes. On peut, du reste, donner à l'aigrette négative la même apparence qu'à la positive, en fournissant beaucoup plus d'électricité. M. Faraday en a conclu que les différences proviennent de ce que le fluide négatif s'échappe plus facilement dans l'air que le fluide positif; de manière que la charge est toujours moindre quand elle est formée

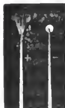


Fig. 959.

de fluide négatif. Nous verrons, en effet, que l'électricité négative se perd plus facilement dans l'air que la positive, et que la différence n'est pas la même dans les divers gaz, ce qui nous donne un nouveau caractère distinctif entre les deux électricités.

Aigrettes dans l'air raréfié. — Quand on diminue la pression de l'air, les aigrettes se produisent plus facilement, et peuvent atteindre une grande longueur. L'expérience de l'œuf électrique met ce résultat en évidence. Quand on fait passer l'électricité à travers un grand tube (*fig.* 960) terminé par des viroles métalliques garnies de pointes, figurées, à part en *a* et *c*, après avoir notablement raréfié l'air, on voit de longues aigrettes allant en se ramifiant à partir du point que reçoit le fluide positif. Quand le vide est complet, on ne distingue plus d'aigrette proprement dite, mais le tube est rempli d'une lueur purpurine, qui semble marcher tumultueusement dans le sens de l'électricité positive, et qui augmente d'éclat dans les points dont on approche un corps bon conducteur.



Fig. 960.

1288. Aigrettes dans différents milieux. — M. Faraday a étudié les aigrettes dans divers gaz. Comme on devait s'y attendre, d'après la nature différente de leurs particules, ces aigrettes présentent des apparences diverses. C'est dans l'*azote* que l'on observe les résultats les plus remarquables : quand ce gaz est raréfié, l'aigrette est magnifique. Dans l'*hydrogène*, elle est verdâtre, même quand il est raréfié, auquel cas elle se ramifie d'une manière très prononcée. Dans l'*oxygène*, les résultats sont analogues à ceux qui se produisent dans l'air, mais bien moins brillants. L'*oxyde de carbone* donne aussi de faibles résultats ; l'aigrette est courte, de couleur verte ; et quand le gaz est raréfié, grise, et d'un très faible éclat. On peut en dire autant de l'*acide carbonique*, si ce n'est que la couleur est légèrement pourpre. Enfin, dans l'*acide chlorhydrique*, il est très difficile d'obtenir des aigrettes, et elles sont encore plus faibles que dans les gaz qui précèdent.

Faraday a aussi obtenu des aigrettes dans l'essence de térébenthine renfermée dans un vase métallique, et dans laquelle il faisait arriver l'électricité par un fil de platine enveloppé d'un tube de verre, excepté à son extrémité. L'aigrette était difficile à obtenir, très petite, et composée de ramifications simples très divergentes, visibles seulement dans l'obscurité la plus profonde.

Tous ces résultats, qui dépendent à un si haut degré de la nature du milieu interposé, sont tout-à-fait indépendants du corps bon conducteur d'où part l'aigrette.

1289. Lumière électrique dans le vide et dans les vapeurs. — Si, comme le pense M. Faraday, l'aigrette électrique n'est qu'une décharge à travers le milieu ambiant, on ne doit plus apercevoir de lumière électrique dans

le vide absolu. Or, le vide le plus parfait que nous puissions faire est le vide barométrique. Cavendish a expérimenté dans cette espèce de vide, au moyen du *double baromètre* (*fig.* 961). *anb*, est un tube recourbé, dont les deux branches contiennent des colonnes de mercure qui font équilibre à la pression atmosphérique, et plongent dans des cuvettes séparées. *n* est un espace vide. On met la cuvette *a* en communication avec une machine électrique, et la cuvette *b*, avec le sol; l'électricité passe d'une cuvette à l'autre à travers les colonnes de mercure et l'espace vide *n*, qui paraît alors rempli d'une lueur agitée à peine visible. Nous savons que la chambre barométrique n'est pas absolument vide de matière pondérable; elle renferme de la vapeur de mercure (II, 938), vapeur extrêmement rare, il est vrai; mais aussi la lueur est excessivement faible, et d'autaut plus que la température étant plus basse, il y a moins de ces vapeurs.

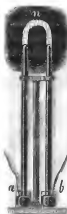


Fig. 961.

H. Davy a fait des expériences qui montrent bien l'influence de la température[1]. Il prit un tube recourbé *cr* (*fig.* 962), muni d'un robinet en fer *r*, et d'une tige de platine *t* scellée dans le verre. La branche fermée ayant été remplie de mercure bien desséché par l'ébullition, il enleva tout l'air de l'espace *c*, en faisant le vide par le robinet *r*. Ayant alors fait communiquer le bouton *t* avec une machine électrique, et le robinet *r* avec le sol, il vit dans l'espace *c* une lueur excessivement faible, quand la température était au-dessous de 0°. Mais quand elle s'élevait, la lumière devenait de plus en plus visible, et quand le tube était très chaud, elle était vive et de couleur verte. Quand un peu d'air était introduit dans l'appareil, la lumière passait au bleu, puis au pourpre. De l'étain pur en fusion ayant été substitué au mercure, et le vide ayant été fait pendant que le tube était plongé dans un bain de métal fondu, et enfin l'appareil ayant été refroidi au-dessous de — 17°; la lueur se montra encore, mais tellement faible qu'on ne pouvait l'apercevoir que dans l'obscurité la plus complète; sa couleur était jaunâtre, et l'intensité n'était pas sensiblement augmentée par la chaleur. Davy a fait d'autres expériences en remplaçant le mercure par l'huile d'olive ou le chlorure d'antimoine. La lueur était blanche et faible dans la vapeur d'huile, purpurine et plus vive, dans celle du chlorure d'antimoine; ces liquides donnent peu de vapeur, surtout l'huile.



Fig. 962.

Lueurs dans le tube barométrique. — Nous avons déjà vu (1261) que le mouvement du mercure dans le tube du baromètre est accompagné d'une

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XX, p. 168.

lueur électrique : le frottement dégage les deux électricités, qui se recombinent aussitôt avec lumière. Pour faire cette expérience avec facilité, on fait un baromètre avec un très long tube, puis on sépare la chambre vide, en fondant le verre à la lampe, comme nous l'avons expliqué dans une autre occasion (II, 713) en y laissant quelques gouttes de mercure (*fig.* 963), que l'on agite dans l'obscurité. On se sert encore de l'appareil représenté (*fig.* 964) : le tube à renflements *tm*, de forme circulaire, contient un peu de mercure *m*. Ce tube



Fig. 963.

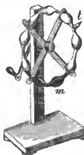


Fig. 964.

faisait d'abord partie de la chambre d'un baromètre, dont on l'a séparé à la lampe, en *t*. Quand on le fait tourner, le mercure produit des lueurs.

1290. Conclusion. — On voit, d'après ce qui précède, que la lumière électrique s'affaiblit à mesure que l'on diminue la quantité de matière pondérable que contient l'espace qu'elle traverse; ce qui est bien d'accord avec la théorie de M. Faraday.

Dans cette théorie, les lueurs qui environnent les fils métalliques qui font communiquer avec le sol les conducteurs des fortes machines électriques, sont dues à des actions par influence dans les molécules de l'air environnant, et peuvent se comparer à ces filets lumineux qui accompagnent les serpenteaux des carreaux magiques (1286). La grande machine du Musée Teyler peut rendre lumineux des fils métalliques de 15 à 20ᵐ de longueur, qui font écouler dans le sol la quantité énorme d'électricité qu'elle produit. Les lueurs que l'on aperçoit dans l'obscurité autour des corps que l'on électrise par le frottement (1261), sont dues de même à la recomposition partielle, à travers l'air, des fluides séparés par le frottement. Deux morceaux de sucre que l'on frotte ou que l'on écrase, deux silex que l'on frappe l'un contre l'autre... donnent de semblables lueurs.

On rattache aussi à des effets électriques, la *phosphorescence* spontanée de certains corps, et celle qui peut être produite dans certains autres par diverses causes. La lumière pâle et sans chaleur appréciable qui constitue la phosphorescence, ressemble, en effet, singulièrement aux lueurs électriques dont nous venons de parler. Nous reviendrons sur ce sujet dans l'optique, en parlant des sources de lumière.

Nous voyons enfin, pour conclure, que la lumière électrique, non seulement n'appartient qu'à l'électricité ou mouvement, mais nous pouvons ajouter maintenant qu'elle est toujours le résultat de la combinaison des deux électricités à travers un milieu pondérable dont la présence est nécessaire à sa manifestation.

§ 3. — LOIS DES FORCES ÉLECTRIQUES. DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ DANS LES CORPS CONDUCTEURS.

I. Lois des attractions et répulsions électriques.

1291. Balance électrique. — Les lois suivant lesquelles varient les intensités des forces électriques, quand les distances et les charges varient, avaient été l'objet des recherches opiniâtres et infructueuses de Hauksbée, Taylor, Dufay, Muschenbroeck, lorsque Coulomb est parvenu à les découvrir au moyen de sa balance de torsion. La *balance électrique* est disposée à peu près comme la balance magnétique (1212). Une cage de verre, cylindrique ou carrée (*fig.* 965), est fermée par un couvercle, qui porte un tube *t*, à la partie supérieure duquel est suspendu un fil métallique. Ce fil soutient une aiguille horizontale en gomme laque *ar*, à l'extrémité de laquelle est fixé un petit disque vertical en papier doré ou en clinquant, *r*. On peut tordre le fil par son extrémité supérieure, soit en faisant tourner une virole dont les divisions passent devant un vernier fixe *c*; soit au moyen d'un bouton auquel est attaché le fil, et qui peut tourner sur lui-même pendant que le micromètre reste en repos. Une division en degrés, tracée autour de la cage cylindrique, à la hauteur de l'aiguille *ar*, sert à en mesurer les déplacements angulaires. Le couvercle porte une ouverture par laquelle on introduit une boule électrisée *b*, soutenue par une tige de gomme laque. De la chaux vive ou du chlorure de calcium, placés au fond de l'appareil, en dessèchent l'air. Les lois trouvées par Coulomb, au moyen de cet appareil, sont les suivantes :

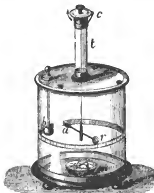


Fig. 965. — 1/12.

1° *Les attractions et les répulsions électriques varient en raison inverse des carrés des distances ;*

2° *Elles sont en raison composée des quantités d'électricité libre que contiennent les corps en présence.*

Si donc *f* représente l'attraction ou la répulsion de deux corps électrisés, à l'unité de distance, et pour des charges égales à l'unité, l'action à la distance *d* pour des charges *e* et *e'*, sera $\frac{fee'}{d^2}$. Ces lois sont celles de la gravitation (1,91). Æpinus, guidé par l'analogie, avait pressenti la seconde.

Pour démontrer la première loi, on fait en sorte que le disque *r* soit en

contact avec la boule *b* en l'absence de toute torsion du fil de suspension. On charge ensuite cette boule d'électricité, on la remet en place, et le disque *r* s'en écarte dès qu'il en a été touché. Quand l'aiguille s'arrête, c'est que la répulsion électrique *e*, à la distance *br*, fait équilibre à la force de torsion. Cette force est mesurée par l'angle de torsion, qui est égal à l'angle α que fait l'aiguille avec sa position primitive ; on a donc $e = t\alpha$, t étant la force de torsion pour 1°. On fait ensuite tourner la virole supérieure d'une quantité β, de manière à amener le disque *r* à une distance de la boule *b*, mesurée par un arc α', moindre que α. L'angle de torsion est alors égal à $\beta + \alpha'$, et la répulsion électrique, à la distance de α', est $e' = t(\beta + \alpha')$. Or, l'expérience montre que l'on a toujours $e : e' = \alpha'^2 : \alpha^2$; ce qui est l'expression de la première loi. Par exemple, Coulomb trouva, dans une série d'expériences, pour des distances représentées par des arcs de 36°, 18°, 8° $\frac{1}{2}$, les angles de torsion 36°, 144°, 575° $\frac{1}{2}$; sensiblement entre eux comme 1, 4, 16.

Pour vérifier la seconde loi, Coulomb remplaçait le disque *r* par une balle de moelle de sureau. Après avoir observé une répulsion à une distance connue, et l'angle de torsion qui la mesurait, il enlevait à la boule *b* la moitié de son électricité en lui faisant toucher une boule identique isolée. Il trouva alors que l'aiguille de gomme laque, dont il ne modifiait pas la charge, s'éloignait moins de la boule *b* ; et quand, en tournant le micromètre, il eut obtenu le même écart que dans la première expérience, l'angle de torsion n'était plus que la moitié de ce qu'il était alors. En enlevant encore la moitié de l'électricité restant sur la boule *b*, il trouvait une torsion quatre fois plus petite pour la même distance, et ainsi de suite. Coulomb a remplacé la boule *b* par des disques, des anneaux, etc., et est toujours arrivé aux mêmes résultats. En faisant varier de même la charge de l'aiguille mobile, il a reconnu que les forces sont aussi proportionnelles à cette charge.

On voit que cette méthode peut servir à comparer les charges électriques de différents corps : il suffit de voir, pour chacun d'eux, quel est l'angle de torsion nécessaire pour déterminer un angle d'écart constant.

Cas des attractions. — Quand on veut observer les lois des attractions, il faut commencer par écarter l'aiguille de gomme laque, de la boule *b*, sans qu'il y ait de torsion dans le fil de suspension. On donne ensuite au disque de clinquant une certaine électricité, et à la boule *b* une électricité contraire. L'attraction agissant, l'aiguille se rapprochera, et la force de torsion développée *pourra* finir par contrebalancer cette attraction. On fera ensuite varier la distance, en faisant tourner le micromètre supérieur de la balance, et l'on comparera les angles de torsion aux distances.

Il faut observer ici que l'attraction et la force de torsion augmentant suivant des lois différentes quand la distance diminue, lorsque la charge sera assez forte pour que la distance devienne très petite, l'attraction pourra aller ensuite en augmentant plus rapidement que la force de torsion ; et il n'y aura pas de position d'équilibre avant le contact. C'est ce que l'expérience montre, ainsi

que le calcul mathématique en s'appuyant sur la loi des carrés des distances supposée démontrée. En effet soit c l'angle d'écart qui sert de point de départ et qui correspond à une torsion nulle, et α cet angle quand l'attraction agit. L'angle de torsion sera $c-\alpha$ et la force de torsion $t(c-\alpha)$. Si nous représentons par f la force attractive à l'unité de distance, elle sera $f : \alpha^2$ à la distance α; et pour qu'il y ait équilibre pour toutes les charges, c'est-à-dire pour toutes les valeurs de f, il faudra qu'il y ait toujours une valeur de α satisfaisant à l'égalité $\frac{f}{\alpha^2}=t(c-\alpha)$, ou $f=t(c-\alpha)\alpha^2$; ce qui suppose que le second membre pourra prendre toutes les valeurs possibles quand on fera varier α depuis c jusqu'à 0. Or, cela n'a pas lieu ; car le second membre a un maximum correspondant à $\alpha=\frac{2}{3}c$, valeur pour laquelle on a $f=\frac{4}{27}tc^3$. Si donc f est plus grand que cette quantité, l'attraction l'emportera sur la force de torsion, et les balles s'avanceront jusqu'au contact. Pour éviter cette rencontre des deux balles, par cette cause ou par l'effet des oscillations de l'aiguille, on tend dans la balance un fil de soie qui empêche l'aiguille de trop s'approcher de la boule b.

Dans l'appareil dont s'est servi Coulomb, le fil de suspension était en argent ; sa longueur était de 76^cm^, et il ne pesait que 3 ou 4 milligrammes. La réaction de torsion était tellement faible qu'on pouvait évaluer des forces égales à $\frac{1}{183}$ de milligramme. Aussi, Coulomb n'employait-il que de très faibles charges. La boule b était formée par la tête d'une grosse épingle, enfoncée dans une baguette de gomme laque.

1292. Causes d'erreurs. — Dans ces expériences, une première cause d'erreur provient de la perte d'électricité pendant les observations, soit par l'air, soit par les supports isolants. La perte par l'air est négligeable quand on opère par un temps sec et qu'on n'emploie que de faibles charges, comme l'a fait Coulomb. On peut éviter la perte par les supports : Coulomb a reconnu qu'une baguette de gomme laque, de 1^{mm} de diamètre et de 40 à 45^{mm} de longueur, suffit pour isoler complétement une balle de moelle de sureau de 10 à 12^{mm} de diamètre ; car, si l'on soutient cette balle par plusieurs baguettes semblables, la perte d'électricité reste la même que lorsqu'il n'y en a qu'une seule. Dans les expériences de Coulomb, la déperdition de l'électricité était si faible que les boules, écartées de 30°, ne se rapprochaient que de 1° en trois minutes ; or, il ne lui en fallait que deux pour faire deux observations comparatives.

Les autres causes d'erreur proviennent de ce que l'on compte les distances sur des arcs, au lieu de les compter sur leur corde, et de ce que la force qui fait équilibre à la torsion n'est qu'une composante de la force attractive ou répulsive. Les deux erreurs tendent à se compenser, comme pour le magnétisme (1213). On en tient compte en comparant les distances

$$d=2l\sin\tfrac{1}{2}\alpha,\ d'=2l\sin\tfrac{1}{2}\alpha', \text{ aux forces } e=\frac{\alpha t}{\cos\frac{1}{2}\alpha}\quad e'=\frac{(\alpha'+\beta)t}{\cos\frac{1}{2}\alpha'}$$

Dans ces expressions, que l'on trouve de la même manière que pour le magnétisme, sauf qu'il n'y a pas à tenir compte de l'action terrestre, e, e' sont les actions électriques pour les angles d'écart α, α' et aux distances réelles d, d' ; t est la force de torsion pour 1°, et l la demi-longueur de l'aiguille. On peut aussi vérifier si, dans l'équation (1213)

$$\frac{\varphi}{4l^2}=b \sin \tfrac{1}{2}\alpha \operatorname{tang} \tfrac{1}{2}\alpha,$$

le second membre reste constant, quelles que soient les valeurs de b et de α. Or, Coulomb a trouvé, pour les valeurs de α citées plus haut (1291), les nombres 3,614, 3,568 3,169. Ces nombres vont en diminuant, mais les différences sont très petites, et doivent être attribuées à la déperdition dans l'air.

M. Biot a appliqué ce calcul aux données des expériences de Coulomb [1], et il a constaté qu'il n'apporte aux résultats, que des changements tellement petits, qu'on peut regarder les deux causes d'erreur comme se compensant exactement, du moins quand l'angle d'écart ne dépasse pas 36°. — On voit que ces calculs sont inutiles pour la seconde loi, car α est alors le même dans toutes les expériences.

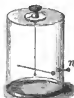


Fig. 966.

1293. Méthode des oscillations. — Coulomb a trouvé les mêmes lois par la méthode des oscillations. Nous avons développé le principe de cette méthode, en traitant du magnétisme (1211). Nous n'avons donc, ici, qu'à indiquer la manière dont se font les expériences. Coulomb a employé une petite aiguille de gomme laque de 3 à 4^{cm} de longueur, suspendue à un fil de cocon de 18 à 20^{cm} de longueur, et portant un petit disque de papier doré. Le tout était renfermé dans un cylindre en verre (*fig.* 966). La mobilité de ce système était telle, qu'une force de moins de $\frac{1}{1200}$ de milligramme suffisait pour faire décrire un tour entier à l'aiguille. On pouvait donc négliger la force de torsion développée dans le fil pendant les oscillations. Le disque de papier doré ayant reçu une certaine charge d'électricité, Coulomb plaçait à une certaine distance et dans la direction de l'aiguille en équilibre, un globe de bois recouvert d'une feuille d'étain, isolé et électrisé. Ce globe avait 32^{cm} de diamètre, et était placé assez loin pour que les lignes menées de son centre au centre du disque pussent être regardées comme parallèles dans toutes les positions de ce dernier, afin que les lois du mouvement pendulaire fussent applicables. En comparant les nombres d'oscillations accomplies pendant le même temps, sous l'influence du globe de bois placé successivement à différentes distances, ou chargé de quantités différentes d'électricité, Coulomb a retrouvé les lois énoncées ci-dessus.

1294. Expériences de M. Harris. — Quelques physiciens ayant annoncé

[1] *Traité de physique expérimentale et mathématique*, t. II, p. 228.

qu'en voulant répéter les expériences de Coulomb, ils avaient trouvé ses lois en défaut, M. Harris a entrepris un grand travail destiné à les vérifier de nouveau [1]. Ces expériences ont été faites au moyen d'un appareil perfectionné, nommé *balance bifile*, dans lequel l'aiguille mobile est suspendue par deux fils de cocon parallèles, comme dans le magnétomètre bifilaire de M. Gauss (1247); seulement les deux fils sont séparés par de petits arrêts en liége qui les empêchent de se rapprocher quand on tord le système. M. Harris a reconnu que l'aiguille ainsi suspendue fait des oscillations isochrones, *quelle que soit l'amplitude*, et que la force capable de retenir l'aiguille à une certaine distance angulaire de sa position d'équilibre, est proportionnelle à cette distance, comme lorsqu'il s'agit de la torsion d'un simple fil.

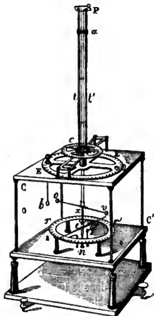


Fig. 967.

La *balance bifile* est représentée dans la *fig.* 967. CC' est une grande cage en verre, dans laquelle est suspendue l'aiguille isolante *ov*, de 27cm de longueur, portant en *o* un disque en or de 7mm de diamètre, et en *v*, un disque en verre pour lui faire équilibre Une seconde aiguille *e*, liée à la première par une tige de cuivre *x*, et formée de deux brins de paille perpendiculaires à *ov*, indique sur le cercle divisé *rr'* les déviations de l'aiguille *ov*. Un petit plateau, que l'on voit entre les lettres *e* et *x*, sert à supporter des poids circulaires, pour augmenter la force de direction du système, et la tige de laiton *x* porte à son extrémité inférieure un petit trou conique dans lequel s'enfonce librement une pointe *n*, afin d'empêcher les oscillations latérales. L'aiguille *ov* est suspendue au moyen de deux fils de cocon parallèles, attachés à la plaque P. Cette plaque est soutenue par le châssis très léger *tPt'*, qui peut tourner autour d'un axe vertical, afin de pouvoir tordre le systéme des fils par le haut. La quantité dont on fait tourner le châssis se mesure sur le cercle fixe *c*, ayant 16cm de diamétre. La longueur de la partie libre des fils peut être modifiée au moyen d'une coulisse *a* qu'ils traversent par de trés petits trous. On voit aussi entre ces fils, les arrêts dont nous avons parlé, qui s'opposent à leur rapprochement, pendant la torsion. Le corps électrisé *b*, qui doit agir sur le disque *o*, est suspendu par une tige isolante, au cercle EE, ayant 35cm de diamétre, et pouvant tourner autour d'un tube que traversent les deux fils de

[1] *Trans. phil.*, 1836, et *Traité de l'électricité et du magn.*, par M. Becquerel, t. V.

suspension, de manière qu'on peut, sans déranger la suspension des fils, rapprocher le corps *b* du disque *o*, d'une quantité indiquée par l'index fixe *i*. Deux petites tiges recourbées, dont une *f*, est terminée par une fourchette, et que l'on fait mouvoir de dessous la cage de verre, servent à agir sur l'aiguille *e*, et à limiter ses oscillations.

Si l'on remplace les deux fils par un fil métallique, on a une balance de torsion bien préférable à celle de Coulomb, tant à cause de la précision avec laquelle on mesure les déviations et les angles de torsion sur des cercles de grand diamètre *c*, *rr'*, que de la facilité avec laquelle on la manœuvre.

Au moyen de cet appareil, M. Harris a trouvé que les lois de Coulomb ne se vérifiaient pas toujours. Ce résultat a excité une vive émotion parmi les physiciens; car il mettait en suspicion des lois regardées comme parfaitement établies. Mais on n'a pas tardé à reconnaître l'intervention de causes accidentelles signalées par M. Harris lui-même, et qui expliquent naturellement les anomalies. En effet, elles ne se présentent que lors des distances très petites. Or, dans ce cas, les fluides se portent vers les surfaces en présence, lorsqu'il y a attraction, et vers les points opposés, lorsqu'il y a répulsion. La distance moyenne des parties électrisées ne peut donc plus être représentée par celle des centres de figure. Il se fait aussi une décomposition de fluide neutre, qui tend à diminuer la répulsion, et peut même la changer en attraction, comme nous l'avons vu. M. Marié Davy a répété avec soin les expériences de M. Harris, et il a reconnu que la loi des distances se vérifie sensiblement sur deux boules électrisées, quand leur distance dépasse 9 à 10 fois leur rayon.

Les lois de Coulomb sont donc exactes pour les éléments électriques; mais si l'on veut les retrouver par l'expérience, il faut opérer sur des corps d'assez petites dimensions pour que les distances respectives de leurs divers points puissent être regardées comme égales entre elles, et qui soient assez éloignés pour qu'il ne s'y fasse pas de déplacement sensible de fluide, et qu'il n'y ait pas de décomposition de fluide neutre par influence. Quand ces conditions ne sont pas remplies, on peut calculer les actions en tenant compte des déplacements de fluides. C'est ce qu'a fait M. Roche, en employant les méthodes analytiques de Poisson, dont nous parlerons plus loin, et en partant des lois de Coulomb appliquées à chacun des éléments électrisés des corps. Les résultats du calcul se sont trouvés d'accord avec ceux que l'expérience a donnés à M. Marié Davy, ce qui fournit une nouvelle confirmation des lois de Coulomb.

1295. Applications aux électromètres. — Le petit appareil de la figure 966 constitue l'électroscope le plus sensible que l'on connaisse. Coulomb en a construit avec un *fil* de gomme laque tiré à la flamme d'une bougie, ayant 27^{mm} de longueur et suspendu à un fil de cocon de 12^{cm} de longueur. L'aiguille, avec son disque, ne pesait qu'un peu plus d'un centigramme. Quand on veut se servir de cet instrument, on fait tourner un petit micromètre auquel est attaché le fil de soie, de manière à amener le disque de l'aiguille, en contact avec une petite tige métallique *n* (*fig.* 966) qui traverse la paroi du

cylindre de verre. Dès que cette tige *n* est mise en communication avec un corps électrisé, l'aiguille de gomme laque est vivement repoussée. La sensibilité de cet instrument est telle que la décomposition par influence qui se fait dans la tige *n*, quand un bâton de résine électrisé lui est présenté à une distance de 1 mètre, suffit pour que l'aiguille soit repoussée de 90°.

Électromètre des sinus [1]. — Un cylindre de verre V (*fig.* 968), pouvant tourner sur lui-même de quantités angulaires mesurées sur un limbe gradué *rr*, est traversé par une tige métallique dont on électrise l'extrémité extérieure *e*. Sur une pointe fixée au milieu de cette tige, pivote une petite aiguille aimantée *ab*. La tige *oe* formant un certain angle avec le méridien magnétique, on fait tourner le couvercle *c* de manière qu'un repère tracé à l'extrémité de l'aiguille *ab* coïncide avec le centre du réticule d'une petite lunette L. On fait ensuite arriver l'électricité en *e*, et elle se répand sur l'aiguille aimantée, qui est repoussée. En faisant tourner le cylindre V, on fait en sorte que l'angle *boe* reste le même; ce qui a lieu quand le centre du réticule de la lunette coïncide de nouveau avec le repère *b*. La force électrique fait alors équilibre à la composante $f \sin \alpha$ de la force magnétique horizontale de la terre, α étant l'angle de l'aiguille avec le méridien magnétique, angle égal à la quantité dont on a fait tourner le cylindre V. Or la force électrique est proportionnelle pour un même écart *boe*, au *carré* de la charge, d'après la loi de Coulomb. On voit donc que les carrés des charges que l'on comparera seront entre eux comme les *sinus* des angles dont on aura tourné le cylindre V pour maintenir toujours le même écart *boe*. L'électromètre des sinus est dû à M. Riess.

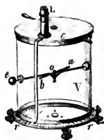


Fig. 968.

II. Distribution de l'électricité en équilibre dans les corps conducteurs.

1296. L'électricité se porte à la surface des corps conducteurs. — Ce principe important a été découvert par Beccaria, puis démontré par Coulomb. Gray avait fait des expériences qui contenaient le germe de cette découverte : ayant isolé deux cubes de bois de même volume extérieur, l'un massif et l'autre creux, et les ayant électrisés en appuyant un bâton de résine frotté, au milieu d'un fil métallique qui les réunissait, il constata qu'ils attiraient avec la même force. Achard arriva au même résultat en employant des corps métalliques. Voici par quelles expériences on établit que l'électricité se porte tout entière à la surface des corps conducteurs.

[1] *Pogg. ann.* t. XCVI, p. 513, et *Ann. de ch. et de ph.* (3e série), XLVI, 502.

1° On prend un vase isolé à parois très minces et de forme quelconque, par exemple, une sphère creuse (*fig.* 969); après l'avoir électrisée, on introduit dans son intérieur, par une ouverture *o*, dont on a grand soin de ne pas toucher les bords, un disque de papier doré *b*, fixé à une tige de gomme laque, et on lui fait toucher la paroi interne; on retire ensuite le disque, et l'on trouve qu'il ne contient pas d'électricité. Si, au contraire, on lui fait toucher la paroi extérieure, on le retire électrisé. Ce petit disque isolé se nomme *plan d'épreuve*.

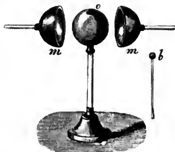


Fig. 969.

Quand on présente le plan d'épreuve à l'électroscope, après l'avoir retiré de l'intérieur du vase, il donne quelquefois des signes d'électricité, mais cette électricité est contraire à celle du vase. Elle se trouve sur la gomme laque, dans laquelle il s'est fait une décomposition de fluide neutre sous l'influence de l'électricité des bords de l'ouverture *o*; et, en effet, cette électricité d'induction persiste quand on touche le disque.

2° On applique sur une sphère (*fig.* 968) deux calottes hémisphériques *m*, *m*, en métal ou en papier doré, que l'on tient par des manches isolants. Après avoir électrisé le système, on retire brusquement et *au même instant* les deux calottes, et l'on trouve que la sphère intérieure ne contient pas de traces d'électricité; tout le fluide a été emporté par les calottes, sur lesquelles on peut en reconnaître la présence.

3° Pour prouver que l'électricité n'occupe au-dessous de la surface, qu'une épaisseur imperceptible, on prend deux sphères isolées, de même diamètre, l'une en métal, massive; l'autre en gomme laque et dorée. On charge l'une de ces boules d'électricité, et l'on mesure la charge au moyen du plan d'épreuve. Pour cela, on applique ce plan sur la sphère électrisée, et on le porte dans la balance électrique. Nous verrons plus loin (1224) que la quantité d'électricité emportée par le plan d'épreuve est proportionnelle à la charge de la sphère. On fait ensuite communiquer cette sphère avec l'autre, qui est à l'état naturel, et l'on reconnaît, au moyen du plan d'épreuve, que les deux sphères ont alors la même charge, et que cette charge est égale exactement à la moitié de celle qu'avait d'abord la première. Il faut donc, puisque les surfaces sont égales, que la couche électrique soit la même sur les deux sphères. Or, sur la sphère en gomme laque dorée, l'électricité ne peut se répandre que dans la couche d'or excessivement mince qui la recouvre; le fluide doit donc occuper, sur la sphère massive, une épaisseur toute aussi petite.

4° On enroule autour d'un cylindre suspendu à des cordons de soie *rr* (*fig.* 970), une bande de toile V à laquelle sont suspendus des électroscopes *e*, *e'*;

on électrise le cylindre, puis, en le faisant tourner au moyen d'une manivelle en verre, on déroule la toile. On voit alors les électroscopes se rapprocher; c'est que toute l'électricité est à la snrface extérieure, surface qui augmente quand on déroule la toile. Quand on l'enroule cnsuitc, on voit les électroscopes s'écartcr de nouveau.



Fig. 970.



Fig. 971.

5° M. Faraday a fait des expériences ingénieuses qui montrent d'une manière frappante cette tendance de l'électricité à s'accumuler à la surface des corps [1]. Il électrisa des vases isolés faits en gaze métallique, et malgré la communication entre l'extérieur et l'intérieur, le plan d'épreuve n'accusa aucune trace d'électricité en dedans. Il électrisa encore un cylindre métallique placé sur nn plateau conducteur isolé; toute l'électricité se trouva en dehors du cylindre. Ayant entouré ce dernier d'un grillage métallique qui le dépassait en hauteur, il ne trouva plus d'électricité sur le cylindre, ct n'en trouva qu'à l'extérieur de chaque barreau.

Enfin, M. Faraday fit cncore l'expéricnce suivante : il fixa à un anneau, porté par une colonne isolante, un cône en mousseline (*fig.* 971), et reconnut, aprés l'avoir électrisé, que toutc l'électricité se trouvait sur la surface extérieure; l'ayant alors retourné au moyen du fil de soie *cc*, de manière que la surface qui était à l'intérieur passât à l'extérieur, l'électricité se transporta sur cette dernière surface, et celle qui avait été retournée en dedans n'en conserva aucune trace.

1297. Explication de l'accumulation de l'électricité à la surface des corps conducteurs. — On peut se rendre compte de l'accumulation de l'électricité à la surfacc dcs corps, par la répulsion qu'elle exerce sur elle-même en suivant les lois de Coulomb. Il résulte d'abord de ces lois, qu'une enveloppe à peu prés sphérique électrisée, n'a pas d'action sur un point placé dans son intérieur. Cette proposition, que nous avons déjà considérée dans l'étude de la pesanteur (I, 129), se démontre, dans le cas de l'électricité, exactement de la même manière. On démontre aussi, comme pour la gravitation, qu'une couche sphérique ou à peu prés sphérique, électrisée également dans tous ses points, agit comme si toute l'électricité était réunie à son centre.

Cela posé, considérons le cas particulier d'un sphéroïde électrisé, et supposons-le divisé en tranches concentriques infiniment minces. Une particule d'électricité placée à la surface d'une de ces tranches, n'éprouvera aucune

[1] *Archives de l'électricité*, t. III, p. 648.

répulsion de la part de l'électricité répandue dans les couches qui lui sont extérieures; elle sera au contraire repoussée par le fluide que pourraient contenir les couches plus rapprochées du centre; elle devra donc s'en éloigner jusqu'à ce qu'elle soit parvenue à la surface, et l'on en dirait autant de toutes les autres particules d'électricité [1]. Une fois arrivée à la surface, l'électricité agira bien toujours pour s'étendre, à cause des répulsions mutuelles des parties opposées de la surface; mais elle sera arrêtée par l'air, qui est mauvais conducteur. Quand l'air est humide, il devient conducteur, et l'électricité se dissipe. Il en est de même dans le vide, et l'écoulement du fluide peut être visible dans l'obscurité, comme nous en avons vu divers exemples (1287). On voit, du reste, que ce n'est pas par sa pression, comme on le dit souvent, que l'air s'oppose à la dispersion de l'électricité, mais simplement par l'obstacle qu'il oppose, comme mauvais conducteur, au passage du fluide; il agit comme le ferait une couche de gomme laque appliquée à la surface du corps.

1298. Epaisseur de la couche électrique. — Tension. — On doit se demander si l'électricité se porte tout entière à la surface mathématique des corps, ou si elle occupe une certaine épaisseur au-dessous de cette surface. On admet généralement la dernière opinion. Au reste, l'épaisseur doit être excessivement petite, comme le montre l'expérience des deux globes en métal et en gomme laque dorée (1295). La couche électrique présente donc deux surfaces; l'une est celle du corps; l'autre est située au-dessous, et n'est parallèle à la première que dans le cas d'une sphère.

Du reste, l'électricité accumulée en un point de la surface d'un corps est toujours repoussée par celle des points opposés, de sorte qu'elle exerce sur l'air un effort auquel il doit résister pour que l'électricité ne se perde pas. C'est cet effort, inégal aux différents points des corps non sphériques, qui constitue ce que l'on nomme la *tension* ou *densité* de l'électricité. Quand cette tension est assez grande pour vaincre la résistance de l'air, elle produit les aigrettes électriques.

Laplace a démontré par l'analyse, en partant des lois de Coulomb, que *la tension en un point est proportionnelle au carré de l'épaisseur de la couche électrique*. On voit facilement que l'action sur l'air est d'abord proportionnelle à l'épaisseur, puisque les particules du fluide situées sur la même normale sont toutes repoussées avec la même force par toute l'électricité du corps. De plus, la répulsion exercée sur chaque particule dépend de leur nombre sur la même normale, ou de l'épaisseur, et l'analyse mathématique montre qu'elle lui est aussi proportionnelle. L'action sur l'air est donc proportionnelle au carré de l'épaisseur.

[1] Les molécules des gaz se repoussent naturellement, et cependant les gaz ne s'accumulent pas près des parois internes des vases qui les renferment. Cela tient à ce que la répulsion qui s'exerce entre leurs molécules n'est pas soumise aux mêmes lois que celles qui président aux actions électriques.

1299. Du rôle de l'air dans la conservation de l'électricité à la surface des conducteurs. — Il résulte des expériences de Coulomb, que la nature d'un corps conducteur n'a pas d'influence sur la quantité d'électricité qui tend à se répandre à sa surface ; car, si l'on prend deux sphères isolées de même diamètre et de substance différente, dont l'une soit électrisée, et qu'on les mette en communication, elles se trouveront chargées chacune de la moitié de l'électricité que contenait la première. Un conducteur doit donc être considéré comme un espace dans lequel l'électricité peut se mouvoir; et sa surface, avec la couche d'air qui l'enveloppe, comme représentant la paroi d'un vase qui s'oppose à la sortie d'un fluide.

On a cru pendant longtemps que l'air seul s'opposait à la dispersion de l'électricité; mais, s'il est incontestable que sa présence est nécessaire quand il s'agit de fortes tensions, l'expérience montre que dans le cas des faibles charges, l'électricité peut se maintenir *dans le vide*, à la surface des conducteurs. Exposons d'abord les faits.

Actions électriques dans le vide. — Hauksbée, le premier, a montré que les actions électriques ont lieu dans le vide comme dans l'air. Gray, en 1732, fit voir qu'une boule de verre, gomme laque, résine ou cire, électrisée, et suspendue dans un récipient par un cordon de soie qui traversait une boîte à cuir, attirait des feuilles d'or, à la même distance, quand le récipient était plein d'air et quand il y avait fait le vide. Dufay fit tourner sous un récipient une boule de verre, ou d'ambre... appuyée sur un tampon, et fixée à l'extrémité d'une tige traversant une boîte à cuir, et il constata que des fils, suspendus à différentes distances de la boule, étaient attirés, quand il avait extrait presque tout l'air du récipient; résultat qui fut confirmé par Boyle.

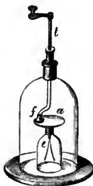


Fig. 972.

Les expériences qui précèdent ont été faites sur des corps mauvais conducteurs, et on peut les expliquer par l'adhérence du fluide à leur surface. Mais, depuis, on a obtenu des résultats analogues au moyen de corps bons conducteurs. H. Davy ayant suspendu à l'extrémité inférieure de la tige de platine *t* de son tube à mercure (*fig.* 962), deux fils très fins en platine ou en acier, terminés par de petites balles de même substance, les vit se repousser dans le vide, quand il électrisait la tige *t* [1]. M. Becquerel a imaginé l'expérience suivante [2]. Sous un récipient (*fig.* 972) est fixé un électroscope *e* dont le bouton est remplacé par un plateau métallique très mince *a*, sur lequel est appliquée une lame de verre, aussi très mince. On frotte sur cette lame de

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XX, p. 174.
[2] *Traité de l'électricité et du magnétisme*, t. V, 2e partie, p. 55.

verre un petit tampon *f*, garni d'or musif, que l'on fait mouvoir au moyen d'une tige *t* qui traverse une boîte à cuir, et que l'on soulève ensuite. Quand le récipient vide est bien desséché, le verre électrisé positivement sur sa surface supérieure, électrise par influence le plateau métallique, et les feuilles d'or s'écartent par du fluide positif. M. Becquerel a vu l'écart persister pendant deux jours, la pression dans le récipient n'étant que de 1 millimètre.

Ces résultats importants avaient été peu remarqués, lorsque M. Harris constata des faits analogues, qui ont été vérifiés par M. Riess[1]. Une tige de métal traversant la tubulure d'un récipient, soutenait dans l'intérieur une boule en cuivre de 5^{cm} de diamètre, et communiquait avec un électromètre placé en dehors. La tige ayant été électrisée, les balles de l'électromètre divergèrent de 40°, et quand le vide eut été fait sous le récipient, la divergence ne changea pas. Les résultats restèrent les mêmes quand on eut placé l'électroscope sous le récipient. Si l'on approchait de la boule électrisée, une autre boule semblable, à l'état neutre, dont la tige traversait une tubulure latérale de la cloche, les balles de l'électromètre se rapprochaient, pour s'écarter de nouveau quand on retirait cette boule. M. Harris arriva à des résultats semblables avec un électromètre à feuilles d'or, dont la cloche était remplacée par un petit ballon rempli d'air, supporté sous un récipient par une colonne isolante. On pouvait aussi approcher du bouton de l'électromètre une boule à l'état neutre traversant la boîte à cuir du récipient.

Interprétation de ces phénomènes. — Pour expliquer pourquoi l'électricité se maintient dans le vide à la surface des corps conducteurs, M. De la Rive[2] suppose que la mince couche d'air qui adhère à la surface de ces corps (I, 149), ne s'en sépare pas, même dans le vide le plus parfait, et qu'elle empêche le passage de l'électricité, quand la tension est faible, comme le ferait une couche de gomme laque. Mais il est bien difficile d'admettre que la couche d'air adhérente ne se dégage pas dans le vide; l'expérience prouve même le contraire. N'y aurait-il pas là plutôt une action des molécules superficielles du corps, analogue à celle qui empêche la chaleur de s'échapper et qui détermine les différences entre les pouvoirs émissifs? Une résistance semblable s'opposerait à la sortie d'une quantité d'électricité correspondante à une faible tension; et, de même que les métaux, bons conducteurs de la chaleur, ne la laissent échapper qu'en petite quantité, de même ces corps, aussi bons conducteurs de l'électricité, auraient le pouvoir le plus prononcé de retenir ce dernier fluide. Il est à remarquer, en effet que les actions électriques observées dans le vide l'ont été au moyen de conducteurs métalliques. La résistance que les meilleurs conducteurs opposent au mouvement de l'électricité, résistance que nous étudierons plus tard, vient encore à l'appui de cette manière de voir. On peut donc admettre que l'électricité est retenue à la surface des corps par la

[1] *Bibliothèque universelle de Genève*, t. XVII (1838), p. 177.

[2] *Traité d'électricité théorique et appliquée*, t. I, p. 128.

résistance que l'air oppose à son passage, et en même temps, mais dans une faible proportion, par une action exercée par les molécules superficielles du corps électrisé. On peut comparer la couche superficielle des corps à ces enveloppes en toile qui retiennent l'eau, tant qu'elle n'exerce pas une trop forte pression. L'action qui a lieu à la surface des métaux dépend probablement de leur nature, mais les différences sont trop faibles pour être aperçues, comme le montre l'expérience citée ci-dessus, de deux sphères égales de substance différente, qui se partagent également l'électricité.

1300. DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ A LA SURFACE DES CORPS. — Le fluide électrique répandu à la surface des corps conducteurs n'y est pas distribué uniformément, si ce n'est quand la forme est sphérique. Coulomb a laissé sur ce sujet de nombreuses expériences qui ont été publiées par M. Biot. Ces expériences ont été faites par la méthode suivante.

Méthode du plan d'épreuve. — Nous avons déjà dit que le plan d'épreuve consiste en un petit disque de clinquant fixé à l'extrémité d'une fine tige de gomme laque *p* (*fig.* 973). Quand on veut comparer les tensions électriques en deux points d'un même corps A, ou de deux corps différents, on applique le petit disque exactement sur la surface en un de ces points *n*, et on le porte dans la balance électrique, dont l'aiguille de gomme laque a été chargée d'avance de la même espèce d'électricité; l'aiguille s'écarte, et l'angle de torsion mesure la répulsion exercée. On opère de même pour l'autre point, en ayant soin de ne pas changer la charge de l'aiguille de la balance, et de ramener cette aiguille, au moyen du micromètre supérieur, à la même position que dans la première expérience. Les angles de torsion observés sont alors entre eux comme les charges successives du plan d'épreuve. Si donc celles-ci sont entre elles comme les tensions aux points touchés, le rapport entre les angles de torsion sera aussi le rapport cherché.

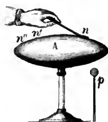


Fig. 973.

Or, on conçoit tout d'abord que la charge du plan d'épreuve doit être proportionnelle à celle de la portion de surface qu'il recouvre. En effet, la face extérieure du disque remplace cette portion de surface, l'électricité devra donc fuir cette dernière et se porter sur la face extérieure du disque, et avec la même tension, s'il est assez mince pour ne pas modifier sensiblement la forme du corps. Quand on enlèvera ensuite le plan d'épreuve, il emportera une quantité de fluide égale à celle que possédait la surface qu'il recouvrait. Porté ensuite dans la balance, il agira sur l'aiguille, comme l'aurait fait cette portion de surface elle-même si on l'y eût transportée avec son électricité. Il est vrai que l'électricité emportée par le plan d'épreuve s'est répandue sur ces deux faces; mais comme il est très mince, les deux faces sont sensiblement à la même distance de l'aiguille de la balance.

Coulomb a fait de nombreuses expériences pour vérifier que la charge du plan d'épreuve est bien proportionnelle à celle du point touché. Ayant mesuré, avec cet instrument, le rapport des tensions t, t' en deux points d'un cylindre isolé ; il mit ce cylindre en contact avec un autre cylindre identique, de manière qu'il y eût symétrie de position de part et d'autre du point de contact. Alors la charge du premier cylindre fut réduite de moitié. Le plan d'épreuve, appliqué aux deux mêmes points du premier cylindre, indiqua les tensions $\frac{1}{2}t$, $\frac{1}{2}t'$, et donna par conséquent le même rapport entre les tensions de ces deux points. Coulomb a encore procédé avec un seul cylindre, sur lequel il mesurait de temps en temps les tensions en deux points déterminés. Les valeurs absolues de ces tensions allaient en diminuant, à cause de la déperdition par l'air et les supports ; mais leur rapport restait toujours le même, ce que le plan d'épreuve a toujours indiqué.

1301. Causes d'erreur. — Pendant la durée des observations, la charge du corps diminue, de sorte que les points touchés les derniers donnent des résultats trop faibles. Pour éviter cette cause d'erreur, il faut expérimenter par un temps bien sec, et procéder de la manière suivante : supposons qu'on veuille comparer les tensions aux points n, n' n''... d'un corps A (*fig.* 973), on appliquera d'abord le plan d'épreuve au point n, puis on le portera dans la balance pour évaluer la tension t en ce point. Au bout d'un certain temps, par exemple 2 minutes, on touchera le point n', et l'on évaluera de même sa tension t'. Au bout de deux autres minutes, on reviendra au point n et l'on mesurera de nouveau sa tension t'', qui sera plus faible à cause de la déperdition, et l'on prendra pour tension au point n, la moyenne $\frac{1}{2}(t + t'')$, que l'on comparera à la tension t'. On comparera de même la tension au point n'' à celle du point n, et ainsi de suite. On voit qu'il suffit de comparer toutes les tensions à celle du point n, sans qu'il soit nécessaire que celle-ci soit constante ; il faudra seulement, au moyen de proportions, rapporter toutes les tensions à la même. Cette manière de procéder suppose que la déperdition est uniforme pendant le temps des observations. C'est ce qui a lieu quand ce temps est très court, comme nous le verrons plus loin en étudiant en particulier cette question.

Il faut supposer aussi que l'aiguille de la balance conserve toute sa charge électrique pendant les deux observations successives que l'on compare. On ne doit donc opérer que par un temps très sec, et après avoir bien desséché l'intérieur de l'appareil, afin de rendre la perte insensible. On peut encore éviter cette cause d'erreur en faisant le disque du plan d'épreuve égal à celui de la balance, et ayant soin de décharger ce dernier avant chaque observation. Alors le plan d'épreuve partage son électricité avec le disque de l'aiguille ; seulement l'angle de torsion ne représente alors que la moitié de la tension que le plan d'épreuve avait reçue du point touché.

1302. Résultats obtenus par Coulomb. — Voici quelques-uns des résultats que M. Biot a trouvés dans les manuscrits de Coulomb.

1° **Lames quadrangulaires.** — Sur une lame d'acier de 1mm,12 d'épaisseur, de 27mm de largeur et de 300mm de longueur, la tension moyenne, prise dans toute la largeur au moyen d'un plan d'épreuve de 27mm de long sur 6 à 7mm de large, est, vers le milieu, sensiblement uniforme et va en augmentant vers les extrémités, où elle est à peu près double de ce qu'elle est au milieu. L'augmentation commence à 28 ou 30mm des extrémités, quelle que soit la longueur de la lame, pourvu qu'elle soit assez longue pour qu'il y ait un espace où la tension soit uniforme. Quand on met le plan d'épreuve sur le prolongement de la lame, en lui en faisant toucher la tranche, il accuse une tension, deux fois plus grande que celle des extrémités; d'où Coulomb a conclu que le plan d'épreuve ne prend bien que l'électricité de la surface qu'il recouvre.

2° **Plateaux circulaires.** — Quand le diamétre a plus de 27cm, l'électricité est répandue uniformément au milieu, jusqu'à 8 ou 10cm du bord; à partir de là, la tension augmente rapidement, suivant une loi indépendante du diamétre. M. Biot a représenté, en général, la tension t à la distance x du bord, par la formule empirique

$$t=1+1,9\left(0,3^{x}-0,3^{2r-x}\right),$$

dans laquelle r représente le rayon du plateau.

3° **Cylindres.** — Sur un cylindre terminé par deux hémisphéres, la tension augmente rapidement vers les extrémités, et d'autant plus que le diamètre est plus petit par rapport à la longueur. Sur un cylindre de 5cm,4 de diamètre et de 80cm de longueur, les rapports entre la tension au milieu et les tensions observées à des distances 0cm; 2cm,7; et 5,cm4 de l'extrémité, ont été 2,30; 1,80; 1,25. On reconnaît dans tous ces résultats l'influence de la répulsion que l'électricité exerce sur elle-même.

Quand le cylindre va en s'amincissant vers l'extrémité, la tension augmente encore plus rapidement à mesure qu'on s'en approche; et enfin, si l'extrémité forme une pointe, la tension y devient si forte que l'air cède, et l'électricité s'échappe en formant une aigrette visible dans l'obscurité.

4° **Globes en contact.** — Coulomb ayant électrisé deux sphères égales, de 22cm de diamétre, tangentes l'une à l'autre, a trouvé la tension nulle autour du point de contact, jusqu'à 20°. De 20° à 30°, la tension est très faible. De 30° à 60°, elle augmente rapidement; puis trés peu de 60° à 90°; et enfin, de 90° à 180°, elle est à peu près constante.

Si le diamétre de l'un des globes n'est que de 11cm, la tension y est presque nulle jusqu'à 30° du point de contact; elle augmente dans le rapport de 10 à 17, entre 60° et 90°; et de 75 à 100, entre 90° et 180°. Plus les globes diffèrent entre eux, plus la tension augmente rapidement, du point de contact au point opposé, sur le plus petit; et plus elle tend à devenir uniforme, sur le plus gros. A 90° du point de contact, les tensions sont dans le rapport de 1,25 à 1, sur deux globes dont les diamètres sont comme 1 : 2.

Si l'on sépare les deux globes, de manière qu'ils n'exercent plus d'influence l'un sur l'autre, le plus petit emporte relativement plus d'électricité que l'autre; car il présente une tension plus grande. D'après les calculs de Poisson, le rapport des tensions sur les deux globes converge vers la limite $\frac{5}{3}$.

Dans le cas des cylindres, Coulomb est arrivé à des résultats analogues. Ayant mis une sphère électrisée, de 21 à 22^{cm} de diamètre, en contact successivement avec des cylindres d'égale longueur et de 5^{cm},4; 2^{cm},7; 0^{cm},45 de diamètre, il trouva sur ces cylindres, après la séparation, les tensions 1,30, 2 et 9, celle de la sphère étant prise pour unité. On voit donc qu'il y a avantage, à égalité de surface, à former les conducteurs secondaires avec des cylindres étroits, comme nous l'avons dit plus haut (1278).

Coulomb a encore étudié la distribution de l'électricité dans une série de sphères égales en contact, de 5 à 6^{cm} de diamètre. Il a trouvé que la tension diminue considérablement du premier globe au second (le rapport était 1,5), et ensuite très lentement, du second jusqu'à celui du milieu. Il y a donc là une grande analogie avec ce qui a lieu sur un cylindre.

1303. Théorie mathématique. — La méthode du plan d'épreuve a conduit Coulomb à plusieurs autres résultats analogues. Ces sortes d'expériences présentent des difficultés pratiques telles, qu'il fallait toute la sagacité, l'adresse extrême et la patience dont il était doué, pour les mener à bonne fin. Cependant les recherches de Coulomb n'ont pas été d'abord appréciées; on ne leur trouvait pas une importance scientifique assez directe. Plus tard, cette importance devint évidente, lorsque Poisson eut publié sa théorie analytique de l'électricité statique [1]; on trouva alors, dans les expériences de Coulomb, le moyen de contrôler les résultats numériques donnés par l'analyse, et de confirmer par leur concordance avec les faits, l'exactitude des méthodes et des formules algébriques.

Poisson est parti de l'hypothèse des deux électricités, s'attirant ou se repoussant en raison composée des quantités de fluide et en raison inverse du carré des distances, et résidant en quantité indéfinie dans les corps, à l'état de fluide neutre. L'électricité libre dans un corps conducteur doit se porter à sa surface, en formant une couche excessivement mince dont l'épaisseur aux différents points est déterminée par la condition que la couche entière n'ait pas d'action sur un point quelconque placé dans l'intérieur. Poisson a examiné différents cas, relatifs à la distribution de l'électricité sur des corps de diverses formes, ou sur plusieurs corps en contact, et à l'influence exercée par plusieurs conducteurs électrisés les uns sur les autres. Appliquant ensuite ses formules aux données numériques des expériences de Coulomb, il a comparé, dans 14 cas différents, les résultats du calcul à ceux de l'observation, et il a toujours trouvé entre eux un accord satisfaisant. Les différences n'ont jamais dépassé $\frac{1}{30}$

[1] *Mémoires de l'Institut, ac. des sciences*, 1811, 1re et 2e partie.

de la quantité évaluée; circonstance très remarquable, vu les nombreuses incertitudes des expériences [1].

Parmi les résultats déduits par Poisson, nous citerons les suivants. Sur un ellipsoïde à trois axes, les tensions aux sommets sont entre elles comme les longueurs des axes qui y aboutissent. Il résulte de là que, si l'on a plusieurs ellipsoïdes de révolution ayant le même équateur et des axes différents, les tensions aux sommets seront proportionnelles aux axes. Si donc l'axe s'allonge de plus en plus, la tension augmentera de même, et finira par vaincre la résistance de l'air quand le sommet présentera une courbure à très petit rayon. Alors l'électricité s'échappera en formant une aigrette, comme cela a lieu quand on place une sphère d'un petit diamètre sur le conducteur d'une machine électrique (1287).

1304. POUVOIR DES POINTES. — Le calcul relatif aux ellipsoïdes de révolution conduit aussi à ce résultat, que, si l'axe s'allonge indéfiniment, de manière que le sommet se transforme en une pointe conique, la tension y devient *infinie*. La résistance de l'air ne peut plus s'opposer à la sortie du fluide; et, en effet, il s'écoule alors d'une manière continue, et sans bruit appréciable. Aussi, ne peut-on obtenir qu'une faible tension sur un conducteur armé d'une pointe; les pointes se comportent relativement à un conducteur électrisé, comme des orifices relativement à un vase rempli de gaz comprimé. Il faut donc éviter les pointes et les angles sur les conducteurs des appareils électriques, et en arrondir avec soin tous les contours.

Pointe présentée à un conducteur. — Les pointes ont encore la faculté, quand elles communiquent avec le sol, de décharger les conducteurs auxquels on les présente. Pour le prouver, on fait tourner avec une vitesse uniforme la roue d'une machine électrique munie d'un électromètre de Henley (1275). Dès qu'on dirige vers le conducteur une pointe que l'on tient à la main, le pendule de l'électromètre s'abaisse, et il se relève dès qu'on retire la pointe. Franklin expliquait ce résultat en disant que les pointes *soutiraient* l'électricité du conducteur. Mais les choses se passent d'une toute autre manière : le fluide neutre de la pointe est décomposé par l'influence de celui du conducteur; le fluide de même nom est repoussé dans le sol, et le fluide de nom contraire, s'échappant de la pointe, se porte sur le conducteur, qui l'attire, pour former du fluide neutre avec l'électricité qu'il contient. Les pointes agissent dès que la décomposition par influence peut avoir lieu, c'est-à-dire à une distance de plusieurs mètres; la machine électrique du musée Teyler rend lumineuse, une pointe placée à plus de 10^{m} de distance.

Pointe isolée. — Si la pointe, au lieu de communiquer avec le sol, est placée sur un corps isolé, elle n'enlève que très peu d'électricité aux conducteurs auxquels on la présente; car le fluide repoussé, ne pouvant passer dans

[1] M. Plana a fait, en 1845, un grand travail sur une partie du sujet traité par Poisson. Il y montre que la loi du carré des distances peut se déduire du fait expérimental que l'électricité se porte à la surface des corps.

le sol, s'oppose bientôt à la décomposition du fluide neutre. Il n'y a donc de neutralisé sur le conducteur électrisé, qu'une quantité de fluide égale à celle qui est décomposée sur celui qui porte la pointe, lequel contiendra autant d'électricité que l'autre en aura perdu, comme si la pointe avait, en effet, *soutiré* cette électricité.

Cette propriété des pointes permet de charger des conducteurs isolés, en les armant d'une pointe dirigée vers la machine électrique, et de répéter avec ces conducteurs toutes les expériences que l'on fait avec ceux de la machine. Par exemple, en mettant près d'une machine en activité les appareils (*fig.* 930, 931, 932, 934) armés d'une pointe et isolés, ils fonctionnent comme s'ils communiquaient directement avec cette machine.

Le pouvoir des pointes est une des plus importantes découvertes de Franklin, à cause de l'application qu'il en a faite au paratonnerre. Nollet avait remarqué que les angles des conducteurs placés dans le voisinage des corps électrisés sont lumineux dans l'obscurité, et c'est en étudiant ce phénomène, que Franklin, en 1750, attribua aux pointes le pouvoir de *tirer* le fluide électrique à de grandes distances, et aussi de le *pousser* quand elles sont placées sur le corps électrisé [1].



Fig. 974.

1305. Mouvements dûs à l'écoulement de l'électricité par les pointes. — Quand l'électricité s'échappe par une pointe, l'air est électrisé et par conséquent repoussé, d'où il résulte un courant de gaz, que l'on peut constater, soit en lui présentant la main, auquel cas on sent un léger souffle, soit en approchant de la pointe dirigée horizontalement, la flamme d'une bougie; cette flamme est chassée latéralement et peut même s'éteindre si la machine est très forte. On peut encore faire agir ce courant sur une petite roue à ailettes nommée *moulinet électrique*.

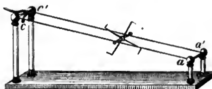


Fig. 975.

Tourniquet électrique. — Ce petit instrument consiste (*fig.* 974) en une chappe, mobile sur un pivot, et portant des tiges métalliques horizontales terminées en pointe recourbée. On fixe l'instrument sur le conducteur d'une machine électrique, et on le voit tourner en sens contraire de l'écoulement de l'électricité par les pointes. Si l'on place l'appareil, non isolé, à une certaine distance de la machine, le mouvement a lieu, par l'écoulement de l'électricité de nom contraire dégagée par influence.

La *fig.* 975 représente une disposition dans laquelle le tourniquet remonte

[1] *Lettres de Franklin sur l'électricité*, traduites par Alibard, t. I, p. 23 et 237.

en tournant, sur deux tringles inclinées *ca*, *c'a'*, isolées par des pieds de verre, et communiquant avec la machine électrique.

Autrefois on expliquait le mouvement du tourniquet par un effet de *réaction* analogue à celui que produisent les fluides pondérables ; mais Aimé a fait voir que cette explication est inexacte [1]. Il suspendit un tourniquet à un fil très fin, fixé à une tige métallique traversant la tubulure d'un récipient ; quand cette tige communiquait avec une machine électrique, le tourniquet faisait plusieurs tours, en tordant le fil ; mais lorsque l'air avait été extrait du récipient, il n'y avait plus aucun mouvement, même lorsque l'appareil avait été recouvert d'une couche de vernis, excepté aux pointes, pour que l'électricité ne pût s'échapper que par là. Il arrivait même que le mouvement avait lieu dans le sens de l'écoulement, quand on présentait aux pointes, pour diriger le fluide vers leur extrémité, des lames métalliques non isolées. On voit donc que la présence de l'air est nécessaire au mouvement du tourniquet. Ce mouvement s'explique par la répulsion qui s'exerce entre l'air électrisé et la pointe elle-même ; répulsion qui chasse l'air d'une part, comme nous venons de le voir, et, de l'autre, fait rétrograder la pointe. Quand le tourniquet est sous une cloche, il s'arrête bientôt, quand tout l'air est électrisé. La rotation a aussi lieu dans l'huile, liquide mauvais conducteur, mais non dans l'eau.

§ 4. — DU CONDENSATEUR. — EFFETS DE LA DÉCHARGE ÉLECTRIQUE.

I. Condensateur électrique.

1306. La quantité d'électricité que l'on peut accumuler sur un corps conducteur isolé, dépend de l'étendue de sa surface, de sa forme, de la tension de la machine qui fournit l'électricité, et enfin du point de ce corps par lequel on fait entrer le fluide. Par exemple, si l'on fait arriver de l'électricité par un fil métallique, en un point de l'équateur d'un ellipsoïde de révolution très allongé, la charge atteindra son maximum quand la tension au point d'arrivée sera égale à celle que la machine communique au fil. Or, quand il en sera ainsi, la tension aux sommets sera beaucoup plus grande qu'à l'équateur (1303). Si l'on eût fait arriver le fluide par un des sommets, la tension en ce point aurait été égale à celle du fil, et partout ailleurs, beaucoup plus faible.

Si l'on approche d'un corps qui reçoit de l'électricité d'une machine, que nous supposons positive, un conducteur non isolé, le fluide négatif qui se dégagera par influence sur ce dernier, attirera le fluide positif que recevra le corps, de manière à diminuer la tension du côté de la machine, ce qui permettra à cette dernière de lui céder une nouvelle quantité de fluide. De cette manière le corps se chargera de beaucoup plus d'électricité qu'en l'absence du conducteur voisin. C'est sur un artifice semblable que repose le jeu du *condensateur électrique* et la théorie de l'électricité dissimulée.

1307. De l'électricité dissimulée. — Considérons une lame isolante *cc* (*fig.* 976) sur laquelle sont appliqués deux plateaux métalliques AA et BB un peu plus petits, isolés et munis de petits pendules *a* et *b*. Faisons communiquer par un fil, le plateau A avec une machine électrique ; il se chargera d'électricité, que nous supposerons positive, et la charge atteindra son maximum quand la tension au point d'arrivée sera égale à celle de la machine, et le pendule *a* s'écartera. En même temps on verra le pendule *b* s'écarter aussi, par suite d'une décomposition par influence qui se fera dans le plateau B. Mais le pendule *b* s'écartera moins que le pendule *a ;* car il y aura moins de fluide positif en B qu'en A (1267).

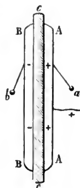


Fig. 976.

Supposons maintenant qu'on sépare le plateau A, de la machine, et qu'on fasse communiquer B avec le sol. On verra aussitôt le pendule *b* retomber tout à fait, parce que le fluide positif de B passera dans le sol. Mais en même temps le pendule *a* s'abaissera notablement. Pour expliquer ce dernier résultat, remarquons que l'électricité de A, obéissant à l'attraction du fluide négatif resté seul sur B, se portera vers la lame isolante ; de sorte qu'il n'en restera que très peu sur la face extérieure de A. Cet effet ne pouvait avoir lieu avant qu'on n'eût chassé dans le sol le fluide positif de B, parce que ce fluide contrebalançait l'action du fluide négatif, et d'autant plus complètement que ce plateau B est plus mince. Remarquons aussi que toute l'électricité de A n'est pas attirée ainsi contre la lame isolante : en effet, nous avons vu qu'il y a moins de fluide négatif en B que de fluide positif en A ; une partie de ce dernier se portera d'abord vers la lame isolante, puis s'opposera, par répulsion, à l'arrivée d'une nouvelle quantité de fluide de même nom. La portion qui restera sera aussi fortement repoussée qu'attirée par le fluide négatif de B ; elle sera donc complètement libre, et comme le fluide qui l'attire est plus éloigné d'elle que le fluide qui la repousse, ce dernier sera en moindre quantité que l'électricité négative de B.

On voit que l'électricité du plateau A se partage en deux parties, l'une libre, l'autre attirée vers la lame isolante, et ne produisant pas de tension *à l'extérieur*. Celle-ci se nomme *électricité dissimulée* ou *latente*. On voit que toute l'électricité du plateau B est dissimulée.

La quantité d'électricité qui reste libre en A possède une tension beaucoup plus faible que celle qui avait lieu avant qu'on eût fait communiquer B avec le sol. Cette tension est donc actuellement moindre que celle de la machine qui a fourni l'électricité. Si donc on fait de nouveau communiquer cette machine avec le plateau A, elle fournira de nouvelle électricité, jusqu'à ce que la tension du fluide libre en A soit de nouveau égale à celle de ses conducteurs. Cette nouvelle électricité déterminera une nouvelle décomposition par influence dans le plateau B, et le pendule *b* s'écartera. Si ensuite, après avoir supprimé la

communication de A avec la machine, on fait communiquer B avec le sol, le pendule *b* retombera, et le pendule *a* se rapprochera, parce que la plus grande partie du fluide positif qu'aura reçu en second lieu le plateau A, sera rendue latente par la nouvelle quantité de fluide négatif produite par influence sur le plateau B. Il y aura donc en A, une plus grande quantité d'électricité positive dissimulée, et aussi une plus grande quantité de fluide libre, qu'avant la seconde opération. On voit aussi que l'électricité négative de B sera entiérement dissimulée, et qu'elle sera en plns grande quantité que celle qui est dissimulée en A. — En répétant de nouveau la même série d'opérations, on fournira aux deux plateaux A et B de nouvelles quantités d'électricité, et l'on en *condensera* ainsi des quantités énormes, qu'ils n'auraient pu recevoir s'ils n'avaient pas été en présence l'un de l'autre.

1308. Condensateur. — A cause de cette propriété, le systéme des deux plateaux conducteurs séparés par une lame isolante, a reçu le nom de *condensateur électrique*. Le plateau A, qui reçoit directement l'électricité, se nomme *plateau collecteur*, l'autre, *plateau condensateur*.

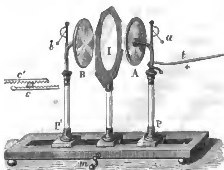


Fig. 977.

Condensateur d'Æpinus. — Pour suivre facilement toutes les phases des opérations que nous avons décrites, on emploie un condensateur à parties mobiles (*fig.* 977). Les deux plateaux A et B, soutenus par des colonnes de verre P, P', et munis d'électrométres *a*, *b*, peuvent s'éloigner ou se rapprocher l'un de l'autre, quand on fait tourner la manivelle *m*. Un pignon denté attaque alors deux crémaillères, que l'on voit à part en *c*, *c'*, fixées aux pieds des colonnes, qui glissent dans une rainure. La lame isolante I est formée d'une plaque de verre qui peut s'enlever, et elle est alors remplacée par une couche d'air. Si, dans ce cas, on écarte les plateaux A et B, les électricités qui se trouvaient retenues à leur surface intérieure deviennent libres, et les pendules s'écartent, pour retomber quand on rapproche les plateaux.

Charge du condensateur. — Pour charger un condensateur, au lieu de procéder par intermittences, comme nous l'avons supposé pour expliquer les différents mouvements d'électricité qui se succédent dans les plateaux, on fait communiquer l'un d'eux avec le sol, et l'autre avec la machine électrique, qui lui fournit de l'électricité d'une manière continue.

Limite de charge. — Les quantités d'électricité que l'on peut accumuler sur les deux plateaux sont limitées par deux causes : 1° la quantité d'électricité

libre augmente sur le plateau A, en même temps que la quantité de fluide qu'il reçoit : il arrivera donc un moment où cette électricité libre aura une tension égale à celle de la machine électrique, qui, dès lors, ne pourra plus céder d'électricité au plateau A. 2° Il peut arriver, avant qu'on n'ait atteint le maximum de charge, que la lame isolante ne puisse résister à l'attraction des deux fluides accumulés de part et d'autre ; alors ces fluides se combineront à travers cette lame, qui sera percée.

1309. Force condensante. — La quantité d'électricité accumulée dans un condensateur dépend du rapport entre la quantité totale d'électricité que contient le plateau collecteur, et la quantité qui s'y trouve libre. Ce rapport se nomme *force condensante*. Si, par exemple, la quantité totale d'électricité est égale à 100 fois la quantité d'électricité libre, il est évident que le plateau contiendra 100 fois plus d'électricité qu'il n'en aurait reçu de la même machine, s'il n'eût pas fait partie d'un condensateur.

Voici comment, d'après M. Biot [1], on calcule la force condensante : Soit V la quantité totale d'électricité vitrée du plateau A, et v la quantité d'électricité libre ; soit aussi R la quantité d'électricité résineuse du plateau B, R sera moindre que V ; on aura donc $R = mV$, m étant une fraction d'autant plus petite que l'épaisseur de la lame isolante est plus grande. Supposons maintenant que l'on touche le plateau A ; son électricité libre passera dans le sol, et il ne restera sur ce plateau que l'électricité dissimulée V', et l'on aura évidemment $V - V' = v$. La quantité R d'électricité du plateau B est alors plus grande que V' (1307), et *si l'on suppose* que le rapport de ces quantités reste toujours égal à m, on a $V' = mR = m^2V$, en remplaçant R par sa valeur. La quantité d'électricité libre est donc

$$[1] \quad v = V - V' = V(1 - m^2), \qquad \text{d'où l'on tire} \quad \frac{V}{v} = \frac{1}{1 - m^2},$$

pour la force condensante. Par exemple, si $m = \frac{99}{100}$, c'est-à-dire si 100 d'électricité positive du plateau A neutralise 99 de fluide négatif sur le plateau B, on aura $V : v = 50{,}25$, c'est-à-dire que le plateau A pourra recevoir à peu près 50 fois plus d'électricité que s'il était seul.

On voit que la force condensante est d'autant plus grande que m diffère moins de l'unité. Or la relation $V : R = m$ montre que m est d'autant plus grand que V et R diffèrent moins, c'est-à-dire que la lame isolante est moins épaisse. Pour avoir une forte condensation, il faudra donc que la lame isolante soit très mince. Mais il y a un milieu à garder ; car, quand elle est trop mince, on est forcé d'arrêter la charge bien au-dessous du maximum, si l'on ne veut s'exposer à voir cette lame transpercée par une décharge spontanée.

Il nous reste à voir comment on peut obtenir par l'expérience la valeur du rapport m. On a bien $R = mV$, d'où $m = \frac{R}{V}$, et il semble qu'on pourrait

séparer les plateaux et prendre le rapport R : V, au moyen du plan d'épreuve. Mais ce procédé serait inexact parce que, comme nous le verrons (1313), la plus grande partie des électricités reste adhérente à la lame isolante. Heureusement qu'on peut remplacer le rapport R : V par le rapport $r : v$ entre la quantité d'électricité libre du plateau A, et la quantité r d'électricité qui devient libre sur le plateau B quand on touche le plateau A. En effet, soit R′ la quantité d'électricité dissimulée sur le plateau B aprés ce contact; on aura $r = R - R'$, et $R' = mV' = m^3V$, puisque $V' = m^2V$. Donc $r = R - R' = mV(1 - m^2)$. Si l'on divise cette valeur de r par la valeur [1] de v, il vient $\frac{r}{v} = m$. Donc $\frac{r}{v} = \frac{R}{V} = m$; ce qui s'énonce en disant que les quantités totales d'électricité sur les deux plateaux sont entre elles comme les quantités d'électricité libres sur chacun d'eux, quand l'autre communique avec le sol. Pour obtenir m, il suffira donc de trouver le rapport $r : v$, ce qui se fera au moyen du plan d'épreuve.

Dans cette méthode on a à comparer rapidement les tensions d'électricités contraires, ce qui présente des difficultés. M. Riess, pour n'avoir à comparer que des électricités de même nature, a employé la méthode qui suit, dans le cas du condensateur *à lame d'air*. On détermine d'abord la tension sur le plateau collecteur, l'autre étant éloigné; on obtient ainsi l'angle de torsion α, et l'on a $\alpha = nV$, n étant une constante, et V la charge totale du plateau. On approche ensuite le second plateau *communiquant avec le sol*, celui-ci contient alors une quantité d'électricité $R = mV$. On supprime la communication avec le sol, on réunit les deux plateaux par un fil métallique, et la charge totale de l'appareil est alors $V - R$. On mesure la tension qui reste, et l'on a pour angle de torsion $\alpha' = n'(V - R)$. Divisant membre à membre par $\alpha = nV$, on tire $\frac{R}{V} = m = 1 - \frac{n\alpha'}{n'\alpha}$. Pour obtenir le rapport $n : n'$, on recommence l'expérience, le plateau condensateur étant isolé; on a alors $R = 0$, et, par conséquent, $1 - \frac{n\alpha'}{n'\alpha} = 0$, d'où l'on tire $n : n'$.

1310. Expériences de M. Riess. — Quelques physiciens ont considéré l'électricité dissimulée comme étant dans un état particulier dans lequel elle ne produirait plus ses effets ordinaires ; mais, d'après la théorie, elle ne peut être dite dissimulée que parce qu'elle n'apparaît pas à la surface extérieure des plateaux, tandis qu'à leur surface intérieure, où elle est accumulée, elle présente ses propriétés ordinaires, et sa distribution pourrait se calculer par les méthodes de Poisson, en tenant compte de l'attraction du fluide du plateau opposé. C'est aussi ce qui a lieu dans l'expérience de la décomposition par influence, où l'on voit les pendules les plus rapprochés du corps électrisé diverger par l'effet de l'électricité attirée, tout comme si elle était libre, et se répandre sur un conducteur isolé juxta-posé (1267). Or, il n'y a pas de différence entre cette expérience et celle du condensateur, si ce n'est que dans ce

dernier, on renouvelle l'électricité pendant quelque temps, de manière à en accumuler de grandes quantités. La distribution de l'électricité dans les plateaux du condensateur dépendra donc de leur forme et de leur étendue. M. Riess a étudié particulièrement cette question à divers points de vue, au moyen d'un appareil à lame d'air, dont le plateau collecteur, de 184^{mm} de diamètre, portait au centre un cylindre de cuivre de 33^{mm} de longueur, dans lequel s'enfonçait une tige de verre verticale servant à le soutenir, et un gros fil de cuivre horizontal de 228^{mm} de longueur, terminé par une sphère S de 16^{mm} de diamètre. Le plateau condensateur communiquait avec le sol par l'intermédiaire des tuyaux de conduite du gaz. Les plateaux pouvaient être facilement éloignés l'un de l'autre[1].

M. Riess s'est d'abord occupé d'évaluer la *force condensante* : pour cela, il mesurait la tension en un point du collecteur, d'abord quand il était séparé du plateau condensateur, puis, quand il en était rapproché; le rapport de ces tensions représente évidemment la force condensante.

1° Quand les tensions sont mesurées sur la boule S, les forces condensantes varient à peu prés en raison inverse des distances des plateaux, quand ces distances sont petites; quand elles sont un peu grandes, les variations sont beaucoup moins rapides; 2° la grosseur de la boule S n'a que peu d'influence sur les résultats, si ce n'est quand la distance est très petite; 3° quand on prend les tensions prés des bords arrondis du plateau, les forces condensantes sont moindres que lorsqu'on les prend sur la boule; d'où l'on doit conclure qu'il y a avantage à amener la charge par le centre plutôt que par le bord. Les résultats se voient dans le tableau suivant :

DISTANCES DES PLATEAUX.		∞	112^{mm},8	45^{mm},1	33^{mm},9	22^{mm},6	11^{mm},3	9^{mm},0	6^{mm},8	4^{mm},5
Valeur inverse de la force condensante prise.	sur la boule.	1	0,89	0,68	0.59	0,19	0,33	0,29	0,23	0,17
	près du bord.	1	0,94	0,83	0,73	0,62	0,46	0,41	0,34	0,26

4° On peut conclure de là qu'un condensateur à grande surface doit donner une plus forte condensation qu'un plus petit; car l'influence du contour est d'autant moins marquée relativement, que la surface est plus grande, les surfaces variant comme les carrés des contours. C'est, en effet, ce que M. Munk af Rosenschöld avait remarqué, et ce qui a été constaté par M. Riess, avec deux condensateurs ayant, l'un 184^{mm} de diamètre, l'autre 117^{mm}.

5° La disposition du fil métallique, qui met le plateau condensateur en communication avec le sol, a aussi une influence marquée; M. Riess a trouvé la force condensante plus grande quand le fil, partant du centre, quittait normalement le plateau que lorsqu'il lui était parallèle à une distance de 11^{mm} environ. Le tableau suivant contient les nombres relatifs aux deux dernières lois.

[1] *Pogg. ann.* t. LXXIII, 367, et *Ann. de ch. et de ph.* (3e série), XLII, p. 376.

DISTANCE DES PLATEAUX.		∞	33mm,9	22mm,6	11mm,3	9mm,0	6mm,8	4mm,5
Valeur inverse de la force condensante.	grand condensateur	1	0,63	0,49	0,30	0,27	0,22	0,15
	petit condensateur.	1	0,77	0,69	0,44	0,39	0,33	0,23
	fil normal.	»	»	0,69	0,44	0,39	0,33	0,23
	fil parallèle.	»	»	0,60	0,41	0,34	0,27	0,19

On voit que la force condensante dépend de bien des conditions. L'expression $\frac{1}{1-m^2}$, par laquelle on la représente ordinairement, ne peut donc être qu'approchée. C'est, en effet, ce qui résulte de la comparaison faite par M. Verdet des valeurs de la force condensante obtenues par M. Riess, à celles que donne la formule, dans laquelle il a introduit les valeurs de m trouvées par le même physicien au moyen de sa méthode (1309). Les différences entre les résultats du calcul et de l'expérience, considérables pour des distances un peu grandes des plateaux, sont bien moins prononcées pour les petites distances.

1311. Décharge du condensateur par contacts successifs. — On peut décharger le condensateur en enlevant successivement aux plateaux isolés le fluide qui y devient libre quand on touche le plateau opposé. Mais pour décharger complètement le condensateur par ce moyen, il faudrait un nombre infini de contacts, de même que pour enlever tout l'air du récipient d'une machine pneumatique parfaite, il faudrait un nombre infini de coups de piston. Ce résultat se déduit du calcul suivant, qui est calqué sur celui que l'on fait dans le cas de la machine pneumatique (I, 330).

Soient $V, V_1, V_2, \ldots V_n$ les quantités d'électricités qui restent sur le plateau A, et $R, R_1, \ldots R_n$, celles qui restent sur B, après qu'ils ont reçu 0, 1, 2, 3 ... n contacts alternatifs. On a, en exprimant les valeurs en fonction de V,

$$\begin{array}{ll} R = \ldots. = mV & V_1 = mR = m^2V \\ R_1 = mV_1 = m^3V & V_2 = mR_1 = m^4V \\ R_2 = mV_2 = m^5V & \ldots\ldots\ldots \\ \ldots\ldots\ldots & \ldots\ldots\ldots \\ R_n = mV_n = m^{2n+1}V & V_n = mR_{n-1} = m^{2n}V \end{array}$$

On voit que les quantités qui restent sur chaque plateau forment une progression géométrique décroissante dont la raison est m^2. On voit aussi que pour que V_n ou R_n soient nuls, il faut que m^{2n} ou m^{2n+1} soient nuls ; ce qui a lieu quand n est infini, m étant plus petit que l'unité.

Les quantités enlevées par les divers contacts successifs forment aussi une

progression géométrique décroissante dont le rapport est m^2. En effet, ces quantités sont, sur les deux plateaux :

$$
\begin{array}{ll}
R - R_1 = mV(1 - m^2) & V - V_1 = m^0 V(1 - m^2 \\
R_1 - R_2 = m^3 V(1 - m^2) & V_1 - V_2 = m^2 V(1 - m^2) \\
V_2 - R_3 = m^5 V(1 - m^2) & V_2 - V_3 = m^4 V(1 - m^2) \\
\ldots\ldots\ldots\ldots & \ldots\ldots\ldots\ldots \\
\ldots\ldots\ldots\ldots & \ldots\ldots\ldots\ldots \\
R_{n-1} - R_n = m^{2n+1}(1 - m^2) & V_{n-1} - V_n = n^{2(n-1)} V(1 - m^2)
\end{array}
$$

et la quantité enlevée ne peut être nulle qu'autant que n est infini.

Si l'on fait la somme des termes en nombre infini des deux progressions qui précèdent, on trouve V pour la première somme, et R pour la seconde, comme on pouvait facilement le prévoir.

Décharge par l'air. — Quand l'air est humide, il décharge peu à peu le condensateur. Soit le condensateur chargé et isolé (*fig.* 978); le pendule *a* du plateau collecteur est écarté, mais l'air enlevant peu à peu l'électricité libre de ce plateau, le pendule *a* s'abaisse peu à peu. En même temps on voit le pendule *b* s'élever lentement par l'électricité qui devient libre sur le plateau qui le porte. Cette électricité se perd bien aussi par l'air, ce qui en met une quantité correspondante en liberté sur l'autre plateau ; mais comme la tension est plus faible en *b* qu'en *a*, la déperdition s'y fait aussi moins rapidement, et le pendule *b* continue à s'élever, et le pendule *a* à s'abaisser, jusqu'à ce que les écarts de part et d'autre soient égaux. A partir de ce moment, les pertes sont égales et les pendules s'abaissent également, et de plus en plus lentement, jusqu'à ce que l'appareil soit entièrement déchargé.



Fig. 978.

On voit par cette expérience, ce que du reste la théorie indique, qu'il y a toujours de l'électricité libre, au moins sur l'un des plateaux ; car si l'on enlève un peu de cette électricité, une partie du fluide du plateau opposé est mise en liberté, et alors il y a du fluide libre sur les deux plateaux en même temps.

1312. Décharge instantanée du condensateur. — Si l'on met les deux plateaux du condensateur en communication, au moyen d'un arc métallique, on obtient une vive étincelle, et le condensateur est déchargé subitement. Il y a ici trois cas à examiner :

1° L'arc métallique *e* (*fig.* 979) est mis d'abord en communication avec le plateau B, qui ne contient pas d'électricité libre. Dans ce cas, le fluide libre du plateau A décompose par influence, avant qu'il n'y ait contact, le fluide neutre de l'arc *e*, repousse le fluide positif vers le plateau B, et attirant le fluide négatif, se combine avec lui en produisant une étincelle, dès que la distance est assez petite. Il y a alors neutralisation d'une partie du fluide de A; du fluide

négatif de B, devient donc libre et se répand sur l'arc *e*, où il est détruit par le fluide positif qui vient d'y être repoussé. Alors de nouvelle électricité libre apparaît sur le plateau A, agit de même sur le fluide neutre de l'arc *e*, et une nouvelle étincelle se produit..., et ainsi de suite jusqu'à ce que le condensateur soit entièrement déchargé. Ces décompositions et recompositions de fluide se succèdent avec la rapidité de l'éclair, de sorte qu'on n'aperçoit en réalité qu'une seule étincelle.

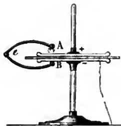


Fig. 997.

2° Si l'arc est appuyé d'abord sur le plateau A qui contient l'électricité libre, une partie de cette électricité se répand sur cet arc, et quitte ainsi le plateau. Une petite quantité de fluide négatif de B devient donc libre, et se trouvant en présence du fluide positif qui s'est répandu dans l'arc, se combine avec lui à travers l'air, dès que la distance est assez petite. La décharge s'achève ensuite comme ci-dessus. Il est évident qu'il faut que l'arc *e* soit isolé ; sans cela on se trouverait dans le premier cas, car l'arc communiquerait d'avance avec B, par l'intermédiaire du sol.

3° Si l'on approche les deux extrémités de l'arc isolé, des deux plateaux en même temps, sans en toucher un avant l'autre, on aura deux étincelles, l'une produite sur le plateau A au moyen de son électricité libre et du fluide négatif développé par influence sur l'arc, l'autre sur le plateau B par la combinaison du fluide positif repoussé dans l'arc, avec le fluide négatif mis en liberté sur le plateau B au moment de la neutralisation du fluide positif de A.

La tension de l'électricité libre est généralement assez faible sur le plateau collecteur, parce qu'on craint que l'explosion ne se fasse à travers la lame isolante, c'est pourquoi l'étincelle est le plus souvent assez courte; mais elle est très grosse, parce qu'elle est produite par de grandes quantités d'électricité, et d'autant plus que la surface de l'appareil est plus étendue. On pourrait, du reste, produire une décharge correspondante à la quantité d'électricité d'un condensateur donné, au moyen de conducteurs secondaires; mais ils devraient présenter une très grande surface.

Commotion électrique. — Si l'on touche en même temps avec les mains les deux plateaux d'un condensateur, les électricités se combinent à travers les bras, et l'on éprouve une secousse brusque et violente accompagnée d'une contraction des muscles et d'une douleur vive mais instantanée, principalement aux articulations des poignets, des bras, et à la poitrine. Ce phénomène est connu sous le nom de *commotion électrique*.

Excitateur. — Comme la commotion des grands condensateurs est dangereuse, on les décharge au moyen de l'*excitateur* (*fig.* 980) formé de deux arcs métalliques terminés en boule, *om*, *on*, et articulés en *o*, que l'on tient au moyen des manches de verre *v*, *v*. Ces manches deviennent inutiles, pour les petits condensateurs, l'électricité suivant de préférence les métaux.

1313. L'électricité est fixée sur la lame isolante. — Les fluides en présence sur les deux plateaux du condensateur tendent l'un vers l'autre avec d'autant plus d'énergie, qu'ils sont plus rapprochés, tellement qu'ils adhèrent aux faces de la lame isolante, et que les plateaux métalliques n'en conservent qu'une faible quantité. Pour le prouver, il suffit de séparer les plateaux d'un condensateur isolé (*fig.* 979); on leur trouve très peu d'électricité, et l'on reconnaît, au moyen d'un électroscope, que les deux faces de la lame isolante sont fortement chargées d'électricités de nom contraire. Si l'on rétablit les plateaux, on peut ensuite obtenir une décharge à peine moins forte que celle qu'on eût obtenue avant de les séparer. Les plateaux ne jouent donc pas d'autre rôle que de recueillir sur la lame isolante, en chaque point qu'ils touchent, l'électricité qui s'y trouve, pour la transporter aux points où aboutit l'excitateur.

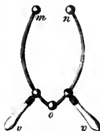


Fig. 980.

Carreau magique. — On met ce dernier résultat en évidence au moyen d'un condensateur, dont la lame de verre est garnie d'aventurine sur une de ses faces. Quand on décharge ce condensateur, on voit l'électricité se rendre de tous les points de l'aventurine, au point où aboutit l'excitateur, en formant une foule de lignes sinueuses d'un vif éclat, analogues à celles que nous avons déjà décrites (*fig.* 956). Le condensateur à aventurine se nomme *carreau magique*, et cette dénomination s'applique plus souvent à cette espèce de condensateur qu'à l'appareil de la *fig.* 956.

Si l'on sépare les plateaux d'un condensateur chargé, et si l'on touche avec deux doigts les faces de la lame isolante, on n'éprouve pas de commotion, parce que l'électricité ne peut se déplacer sur le verre pour se rendre aux points de contact. Mais si l'on applique les mains sur ces deux faces, on reçoit une commotion provenant de toute l'électricité qui adhère aux parties de la lame recouvertes par les mains.

L'adhérence de l'électricité à la lame isolante est telle que tout ne contribue pas à la première décharge. Au bout de quelque temps, on peut obtenir une faible étincelle, plus tard une troisième et une quatrième, plus faibles encore. Ces étincelles sont produites par les portions de fluides qui n'avaient pu se séparer de la lame isolante lors de la première décharge. Cette électricité avait pénétré à une certaine profondeur dans la lame; car si, après avoir déchargé le condensateur, on enlève les plateaux, la lame isolante ne semble pas d'abord électrisée, et ce n'est qu'au bout de quelques instants qu'on trouve sur les faces, les électricités qui arrivent de l'intérieur.

1314. BOUTEILLE DE LEYDE. — On construit souvent le condensateur avec un flacon de verre (*fig.* 981), revêtu à l'extérieur d'une feuille d'étain n'allant pas jusqu'en haut, et rempli dans l'intérieur, de feuilles d'or qui remplacent la seconde lame métallique. Une tige à crochet *c*, fixée par un bouchon, commu-

nique avec l'intérieur. Sous cette forme, le condensateur porte le nom de *bouteille de Leyde*. La lame d'étain forme ce que l'on nomme l'*armature* extérieure de la bouteille, et les feuilles d'or, l'*armature* intérieure. Pour charger la bouteille de Leyde, on la tient par la *panse*, et l'on fait communiquer le bouton *c* avec la machine électrique. On peut remplacer les feuilles d'or de l'intérieur par de l'eau ou même par le vide ; dans ce dernier cas, le fluide se répand dans le vide, et vient se fixer à la surface du verre.



Fig 981.

C'est sous la forme de la bouteille, que le condensateur a été découvert, à Leyde, en 1746, par Cuneus, élève de Muschenbroeck. En répétant les expériences de son maître, Cuneus eut l'idée d'électriser de l'eau, dans un vase de verre qu'il tenait à la main. Ayant voulu retirer avec l'autre main le fil de fer par lequel l'électricité passait dans l'eau, il ressentit une violente commotion, qui l'effraya vivement et l'étonna encore davantage. On voit que l'eau formait l'armature intérieure d'un véritable condensateur, dont la main appliquée à l'extérieur formait l'autre armature. La nouvelle de cette expérience se répandit rapidement, et les récits exagérés qui en furent faits contribuèrent singulièrement à exciter la curiosité. Muschenbroeck écrivit à Réaumur qu'il ne voudrait pas, pour la couronne de France, s'exposer à recevoir une nouvelle commotion. Allaman, élève de Sgravesande, dit que la secousse lui fit perdre un instant la respiration, et Winkler assure avoir éprouvé de violentes convulsions. Ces effets exagérés doivent être mis sur le compte de la frayeur des premiers expérimentateurs ; frayeur bien légitime, lorsqu'on songe à la violence et à l'instantanéité de la secousse. On se familiarisa bientôt avec le phénomène, et Nollet répéta l'expérience sur 300 gardes du roi, *formant la chaîne*, c'est-à-dire se donnant la main deux à deux. La main du premier homme de la série étant appuyée sur l'armature extérieure de la bouteille, au moment où le dernier touchait le bouton, les 300 hommes reçurent simultanément la commotion. Nollet a encore fait passer la décharge à travers le corps d'oiseaux, par l'intermédiaire d'un fil métallique de 4000 mètres de longueur, et la commotion fut assez forte pour les tuer. En 1746, Wilson augmenta l'effet, en mettant à l'extérieur du vase de verre une couche d'eau de même hauteur que dans l'intérieur, et Bevis, et plus tard Watson, appliquèrent des feuilles d'étain sur le verre, et employèrent des condensateurs plans, dont la théorie fut ensuite établie, principalement par Æpinus.

L'électricité de la bouteille reste sur le verre. — C'est par l'étude de la bouteille de Leyde que Franklin débuta dans la carrière de l'électricité. Il découvrit que les deux faces sont électrisées d'une manière opposée, et il reconnut que l'électricité adhère au verre (1313). Pour le prouver, il isola la bouteille, qui contenait de l'eau, et, après l'avoir électrisée, il versa le liquide

dans une autre bouteille; celle-ci ne donna pas de décharge. Ayant versé de l'eau fraîche dans la première bouteille, il en tira une forte étincelle. D'Alibart a répété cette expérience en employant du plomb de chasse ou de la limaille métallique, au lieu d'eau. Aujourd'hui, on opère au moyen d'une bouteille de Leyde qui peut se démonter (*fig.* 982). Elle est composée d'un vase en métal un peu conique *b*, dans lequel on enfonce un vase en verre *v*, qui s'y adapte aussi exactement que possible, et dans lequel on introduit un second vase de métal *a*, muni d'un crochet. Après avoir chargé ce condensateur à armatures mobiles, on enlève le vase intérieur *a*, au moyen d'une baguette de verre, puis on retire le vase de verre *v*. Après avoir reconnu que ce vase est fortement électrisé, et avoir touché les deux armatures, on recompose le condensateur, en ayant soin de tenir le vase *a* avec une tige isolante, et l'on peut ensuite en obtenir une forte décharge.

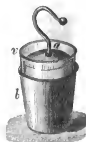
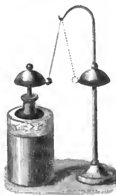


Fig. 982.


Fig 983.

Pour montrer que les armatures recueillent l'électricité du verre pour la transporter au point où aboutit l'excitateur, on emploie une bouteille à aventurine (*fig.* 983), dont le bouton est assez rapproché de l'armature extérieure pour que la décharge ait lieu d'elle-même. On la suspend à la machine électrique, l'anneau métallique qui est au bas de l'armature extérieure communiquant avec le sol; et il se fait de temps en temps des décharges, à chacune desquelles on voit des serpenteaux qui convergent vers le point où aboutit l'étincelle.


Fig. 984.

1315. Mouvements produits par l'électricité libre de la bouteille. — L'armature intérieure de la bouteille de Leyde contenant toujours de l'électricité libre quand l'armature extérieure communique avec le sol, on s'en sert pour produire différents effets.

Carillon à bouteille. — Une balle métallique est suspendue par un fil de soie, entre le timbre fixé à la tige d'une bouteille de Leyde chargée, et le timbre non isolé placé à côté (*fig.* 984). La balle est attirée par l'électricité libre du timbre de gauche, s'électrise en le touchant, est repoussée et vient se décharger en frappant le timbre de droite; après quoi elle est de nouveau attirée. Au lieu du pendule oscillant, on peut suspendre l'araignée de Franklin (1271).

Balancier électrique. — Deux bouteilles de Leyde A et B, chargées et communiquant avec le sol (*fig.* 985), sont placées de chaque côté d'une colonne soutenant un balancier en verre *ab*, terminé par deux boules métalliques. Ces boules oscillent entre les boutons des bouteilles de Leyde, et les

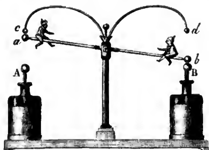


Fig. 985.



Fig. 986.

boules *c* et *d* qui communiquent avec le sol. Chaque moitié de l'appareil fonctionne comme le pendule du carillon à bouteille.

1316. Jarres; batteries. — Une *jarre* est un condensateur formé d'un grand vase de verre à large ouverture, sur laquelle on peut coller une feuille d'étain en dedans aussi bien qu'en dehors (*fig.* 986). Une tige *t*, qui s'appuie au fond, sert à charger la jarre pendant que son armature extérieure communique avec le sol. On fait des jarres de grandes dimensions; souvent les armatures ont chacune plus de $\frac{1}{2}$ mètre carré.

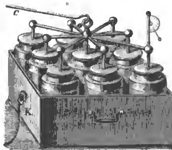


Fig. 987.

Batteries électriques. — Bevis et Watson ont eu l'idée de réunir plusieurs jarres, placées dans une même boite doublée d'étain (*fig.* 987), de manière que toutes les armatures extérieures communiquent entre elles, et avec le sol par une chaine, K. Toutes les armatures intérieures communiquent entre elles par des tringles métalliques, qui réunissent des tiges fixées par un bouchon à l'ouverture de chaque jarre, et auxquelles sont attachés des fils de laiton qui vont toucher le fond. Un semblable système se nomme une *batterie électrique*. On réunit souvent plusieurs batteries dont on fait communiquer, au moyen de tringles, les armatures intérieures.

1317. Charge par cascade. — Quand une batterie présente une grande surface, il faut, pour la charger, de grandes quantités d'électricités, et l'opé-

ration devient longue et pénible. On la rend beaucoup plus prompte, en divisant la batterie en plusieurs parties B, B', B'' (*fig.* 988), que l'on isole sur des tabourets à pieds de verre, et que l'on fait communiquer entre elles au moyen de tringles *t*, *t'*, de manière que l'armature *extérieure* de B, qui reçoit l'électricité en *n*, communique avec l'armature *intérieure* de la suivante, B'; l'armature extérieure de celle-ci communique avec l'intérieur de B'', dont l'armature extérieure communique avec le sol par une chaîne *c*. Dans cette méthode, due à Franklin, et nommée *charge par cascade*, les différentes batteries partielles se chargent les unes par les autres, et l'on n'a à fournir que l'électricité nécessaire pour charger la première B. En effet, le fluide repoussé dans l'armature extérieure de B passe dans l'intérieur de B'; de même, le fluide repoussé à l'extérieur de B' passe dans l'intérieur de B''. Quand B est suffisamment chargé, on enlève les tringles *t*, *t'*, au moyen d'une tige de verre, et l'on pose de nouvelles tringles, en les tenant par des tiges isolantes, sur les diverses batteries partielles, de manière à faire communiquer entre elles toutes leurs armatures intérieures. Les charges s'égalisent alors; car il faut remarquer que les dernières boîtes sont toujours moins chargées que les premières; c'est pourquoi on fait marcher encore la machine électrique pour compléter la charge.

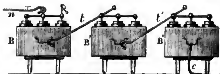


Fig. 988.

Les quantités d'électricités qui se trouvent sur les armatures intérieures et extérieures des différentes parties B, B', B'',... forment une progression géométrique décroissante, dont la raison est : $m^2 = R^2 : V^2$; en effet, soient

$$V_1, V_2, V_3..., V_n; \qquad R_1, R_2, R_3..., R_n$$

les quantités d'électricités qui se trouvent sur les deux armatures des différentes batteries partielles, supposées égales entre elles. La quantité d'électricité négative de l'armature extérieure de l'une d'elles étant égale à la quantité d'électricité positive de l'intérieur de celle qui la suit, on aura

$$R_1 = V_2,\ R_2 = V_3,\ ....\ R_{n-1} = V_n;$$

et comme on a aussi (1311) $R_1 = mV_1$, $R_2 = mV_2$,... $R_{n-1} = mV_{n-1}$,

il vient $R_1 = V_2 = mV_1$, $R_2 = V_3 = m^2V_1$,... $R_{n-1} = V_n = m^{n-1}V_1$.

Par exemple, si nous faisions $m = R : V = \frac{99}{100}$, et si nous supposons qu'il y ait 10 batteries partielles, la charge de la dixième ne sera que

$$m^{n-1}V_1 = (\tfrac{99}{100})^9 V_1 = 0{,}9125\, V_1.$$

1318. Piles électriques. — Le calcul qui précède va nous conduire

à trouver la distribution de l'électricité dans les *piles électriques*. On nomme ainsi une série de condensateurs plans égaux, placés les uns à la suite des autres, de manière que leurs armatures communiquent deux à deux, comme on le voit en AB et en aC (*fig.* 989). Si l'on met le plateau a en rapport avec une machine électrique, les divers condensateurs se chargeront les uns par les autres, comme dans la charge par cascade. Si la machine donne du fluide positif, on ne trouvera de libre dans l'appareil, au moyen du plan d'épreuve, que du fluide positif allant en diminuant du plateau collecteur à celui qui communique avec le sol. En effet, la tension de l'électricité libre du premier plateau est $v_1 = V_1(1 - m^2)$ (1309); l'électricité positive repoussée en a', et servant à charger le condensateur $c'a'$, restera en partie libre avec la tension $v_2 = V_2(1 - m^2)$. Mais V_2 est égal à la quantité $R_1 = mV_1$ d'électricité négative du plateau c; d'où $v_2 = mV_1(1 - m^2)$. De même, on aurait $v_3 = m^2V_1(1 - m^2)$ pour la tension de l'électricité positive libre en a'', et ainsi de suite.

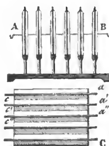


Fig. 989.

Si l'on ôte la moitié du fluide qui est libre à l'une des extrémités de la pile *isolée*, l'autre extrémité contiendra une quantité égale de fluide libre de nom contraire, et les deux moitiés seront chargées d'électricité libre, allant en diminuant de tension, des extrémités au milieu, où la tension sera nulle. C'est ce qui arrive quand la pile étant isolée, l'air humide enlève peu à peu le fluide libre, comme dans le cas cité ci-dessus (1311).

Ces résultats se trouvent par le calcul, et par l'expérience au moyen du système AB (*fig.* 989), dont les condensateurs sont séparés les uns des autres.

Si l'on fait communiquer les deux armatures extrêmes de la pile, la décharge que l'on obtient ne correspond qu'aux quantités d'électricité que contiennent ces deux armatures; car les fluides des armatures intermédiaires se neutralisent mutuellement deux à deux.

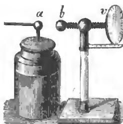


Fig. 990.

1319. Manière de régler la charge des batteries. — Il est important, pendant qu'on charge une batterie, de connaître à chaque instant la tension de l'électricité libre intérieure afin de ne pas trop charger, parce que l'on risquerait de percer quelque jarre. On se sert souvent, pour cela, de l'électromètre de Henley, que l'on place sur l'une des jarres, comme on le voit dans les *fig.* 987 et 988. On emploie aussi les appareils suivants qui déchargent spontanément la batterie, dès que la charge atteint une certaine limite.

Electromètre de Lane. — Une boule b (*fig.* 990), fixée à l'extrémité

d'une vis micrométrique *v*, communique avec l'armature extérieure de la batterie. On l'éloigne de la boule *a*, qui communique avec l'armature intérieure, de manière que l'explosion se fasse en *ab*, quand on dépasse une certaine limite de charge.

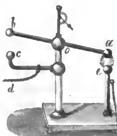


Fig. 991.

Electromètre de Cuthberson. — Une boule isolée *c* (*fig.* 991) communique avec l'intérieur de la batterie. Un fléau *ba*, terminé par deux boules, mobile en *o*, et communiquant avec la boule *c*, est équilibré de manière que les boules *c* et *b* soient en contact quand la charge est au-dessous d'une certaine limite; mais quand cette charge devient trop forte, le bouton *b*, repoussé, s'élève peu à peu, et la boule *a* s'approchant d'une autre boule *e* qui communique avec l'armature extérieure, la décharge a lieu. Un électromètre de Henley fait connaître si l'on approche du moment de l'explosion. On voit que cet électromètre constitue, comme celui de Lane, un véritable appareil de sûreté, destiné à préserver les jarres de la rupture qui pourrait résulter d'une trop forte charge.

II. Applications du condensateur aux appareils électrométriques.

1320. Bouteille électrométrique. — Cet instrument est destiné à mesurer, au moyen d'une unité spéciale, les quantités d'électricité fournies par une machine, ou reçues par une batterie. Il consiste (*fig.* 992) en une bouteille de Leyde O, dont la tige communique, par la tringle B, avec la source d'électricité. Le bouton *c* est en présence d'un autre bouton *b* qu'on peut en approcher plus ou moins, au moyen d'une vis à micromètre *v* qui communique avec l'armature extérieure de la bouteille, par le fil de platine roulé en spirale, *t*. Voici maintenant comment fonctionne la bouteille. L'électricité fournie charge la bouteille O, celle-ci se décharge d'elle-même par les boules *c*, *b*, dès qu'elle contient une quantité d'électricité suffisante, et le nombre de décharges fait connaître combien de fois cette quantité a été fournie par la machine. Pour que les résultats soient exacts, il faut faire tourner la machine aussi régulièrement que possible. Il faut aussi éviter que la bouteille électrométrique ne se décharge en partie, par l'air,

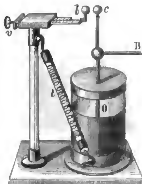


Fig. 992.

ou par la surface du verre. On rend ces pertes négligeables, en plaçant les boules *a*, *b* à une petite distance l'une de l'autre, afin que les décharges soient fréquentes. Comme exemple, nous citerons la comparaison entre les machines de Ramsden et hydro-électrique de l'Institut polytechnique de Londres, dont la première donne 3 décharges par minute, d'une grande jarre électrométrique, tandis que la seconde en donne 140 dans le même temps.

Quand on veut évaluer la quantité d'électricité introduite dans une batterie, on l'isole, et l'on fait communiquer son armature extérieure avec la tige *b*. Le nombre de décharges fait connaître la quantité d'électricité repoussée dans l'armature extérieure, et par conséquent la quantité de fluide contraire accumulée sur cette armature.

1321. Condensateur de Volta. — Cet appareil est destiné à reconnaître l'électricité d'une source *continue*, donnant de l'électricité à tension trop faible pour qu'on puisse en constater la présence. Il consiste en un plateau conducteur recouvert d'une feuille de taffetas gommé, sur laquelle on pose un plateau métallique à manche de verre. Ce système forme un condensateur dont la lame isolante est formée par le taffetas. On fait communiquer la source d'électricité avec le plateau métallique, pendant que le plateau inférieur communique avec le sol, et ce condensateur se charge peu à peu. La force condensante étant très grande à cause de la faible épaisseur de la lame isolante, on peut au bout d'un certain temps, en soulevant le plateau supérieur, y reconnaître la présence de l'électricité. Les fluides adhérant à la lame isolante (1313), le plateau collecteur doit être garni en dessous d'une couche de vernis isolant qui arrête l'électricité, de manière que le plateau puisse l'emporter avec lui.

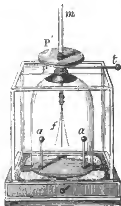


Fig. 993.

1322. Electromètre condensateur. — Pour reconnaître les plus faibles sources d'électricité, Volta a associé le condensateur à l'électromètre à feuille d'or, dans un appareil extrêmement sensible, célèbre par les recherches importantes auxquelles il l'a appliqué. Cet appareil (*fig.* 993) consiste en un électromètre à feuilles d'or *f*, surmonté d'un condensateur PP' dont les plateaux sont, l'*un* et l'*autre*, garnis d'une mince couche de gomme laque. Les deux couches réunies forment une lame isolante se séparant en deux parties quand on enlève le plateau supérieur. On fait communiquer la source électrique avec le plateau P', pendant que le plateau P communique avec le sol par la tige *t*. Au bout d'un certain temps, on supprime cette communication, et l'on enlève le plateau P', par le manche isolant *m*. La couche de gomme laque du plateau P' emporte avec elle le fluide de ce plateau, tandis que le fluide de nom contraire développé dans le plateau P, devient libre et fait écarter les feuilles d'or. Les petites colonnes *a*, *a*

réagissent pour augmenter l'écart, et elles déchargent les feuilles d'or quand elles s'écartent trop.

L'électromètre condensateur doit être desséché avec soin ; on l'entoure d'une cage de verre dont le socle est muni d'un tiroir contenant de la chaux vive, ou du chlorure de calcium.

1323. Electromètre de Peltier. — Cet instrument (*fig.* 994) est muni d'un condensateur *c*, semblable à celui de l'appareil précédent, et dont le plateau inférieur communique avec un support isolé K. Une aiguille *ee*, formée d'un fil de cuivre, porte une pointe, qui s'appuie au fond d'une petite coupe en acier, fixée au support K. Une aiguille aimantée donne au système une légère force directrice. On oriente l'appareil de manière que l'aiguille *ee* touche le support K. Quand ensuite, après avoir chargé le condensateur *c*, on enlève son plateau supérieur, l'aiguille *ee*, ne partageant l'électricité que du support K, s'en écarte d'une quantité angulaire que l'on mesure sur un cercle gradué. Le petit plateau conducteur *o*, que l'on approche plus ou moins de l'aiguille, au moyen du levier *o'*,

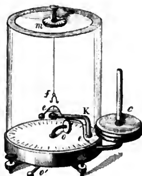


Fig. 994.

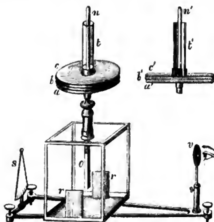


Fig. 995.

augmente la déviation. Enfin, on peut transformer l'appareil en balance de torsion, en soulevant l'aiguille *ee*, au moyen du double crochet *f* suspendu à un fil fixé au micromètre *m*.

1324. Electromètre condensateur à trois plateaux. — Peclet a imaginé, vers 1838, un électromètre condensateur dont la sensibilité dépasse de beaucoup celle des instruments qui précèdent[1]. Cet appareil consiste en un électromètre à feuilles d'or (*fig.* 995); surmonté d'un condensateur à trois plateaux *a*, *b*, *c* en verre dépoli et doré, dont on voit la coupe en *a'*, *b'*, *c'*. Les deux premiers forment un condensateur ordinaire. Le plateau *b*, *b'* muni de son

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LXVII, et 3e série, t. II, p. 100.

manche isolant *n*, *n'* est garni d'une couche de gomme laque sur ses deux faces, et non sur son contour. Un troisième plateau *c*, *c'* verni en dessous, peut s'appliquer sur lui, et être soulevé au moyen d'un tube de verre *t*, *t'* que traverse le manche isolant *n*. Pour se servir de cet appareil, on met la source électrique en contact avec le plateau *c*, *c'* pendant qu'on touche *b*, *b'* avec le doigt, et le condensateur *cb*, *c'b'* se charge comme à l'ordinaire. On enlève ensuite le plateau *c*, *c'* ; l'électricité qui était dissimulée sur la face supérieure de *b*, devient libre, et si l'on fait communiquer *a*, *a'* avec le sol, le condensateur *ab*, *a'b'* se charge, et l'électricité de *b* est dissimulée presque totalement. Si maintenant on replace le plateau *c*, *c'*, qui a conservé son électricité, ou bien auquel on en communique une nouvelle dose, le condensateur *cb*, *c'b'* se charge comme précédemment, et en enlevant le plateau *c*, *c'*, l'électricité nouvellement dégagée en *b*, devient libre et vient augmenter la charge du condensateur *ba*, *b'a'*, dont on fait communiquer le plateau *a* avec le sol. En continuant ainsi, on pourra accumuler en *ba* des quantités d'électricité croissantes, au moyen de la quantité limitée fournie d'abord au plateau *c*. Si l'on enlève ensuite les plateaux *b* et *c*, les feuilles d'or divergent. Peclet a reconnu que l'écart est proportionnel au nombre de manipulations, c'est-à-dire à la quantité d'électricité accumulée dans le plateau *a*, quand l'angle ne dépasse pas 20°. Pour évaluer cet angle, on regarde par un petit trou *v*, et l'on voit sur quelles divisions du secteur S se projettent les feuilles d'or.

Bennet avait déjà eu l'idée de multiplier la charge d'un électromètre, au moyen d'un condensateur à trois plateaux, qu'il nommait *doubleur* d'électricité ; mais il opérait d'une manière toute différente, et Cavallo a reconnu qu'il y avait de nombreuses incertitudes dans sa méthode.

1325. Condensateur double de MM. Pfaff et Svanberg. — Ce système de condensateurs permet d'obtenir des étincelles, au moyen d'une dose unique et très faible d'électricité. Deux condensateurs isolés *ab*, *cd* (*fig.* 996), dont la lame isolante est formée de deux plaques de verre très minces mastiquées aux plateaux, ont leurs plateaux inférieurs réunis par un fil métallique *e*. Le plateau *a* reçoit une charge $+V$, pendant que *b* communique avec le sol ; *b* prend alors une charge $-mV$. On enlève *a* et l'on fait communiquer *c* avec le sol ;



Fig. 996.

l'électricité négative de *b*, devenue libre, se porte en *d*, et *c* prend la charge $+m^2V$. On replace le plateau *a*, qui a conservé son électricité $+V$, et l'on fait communiquer *b* avec le sol ; ce plateau prend une nouvelle dose $-mV$, que l'on fait encore passer sur *d*, en soulevant *a* et touchant *c*. Les choses se passent jusqu'à présent comme dans le condensateur à trois plateaux de Peclet. En répétant une troisième fois la même opération, la charge de *d* devient $3mV$. Cela fait, on pourra transporter cette charge en *b*, comme on a transporté celle de *b* en *d*, et, après trois opérations, la charge de *b* sera $3 \times 3mV = 3^2mV$.

Transportant alors cette charge de b en d, on pourra, par trois opérations nouvelles, avoir sur d la charge 3.3^2mV; et en faisant n fois la triple manipulation, on aura sur le plateau chargé en dernier lieu, 3^nmV. On ne fait que tripler la charge de chaque plateau avant de la transporter sur l'autre, parce que ce nombre donne le résultat le plus favorable, pour un nombre déterminé d'opérations simples. Par exemple, pour 24 opérations, si l'on double seulement la charge avant de la transporter, il y aura à faire 12 transports, et la charge définitive sera $2^{12}mV = 4096mV$. Avec la charge triple, on aurait $3^8mV = 6561\,mV$: et avec la charge quadruple, il viendrait $4^6mV = 4096\,mV$. Un appareil de ce genre, construit pour l'Université d'Upsal, et dont les plateaux ont 16 centimètres de diamètre, donne, au bout de 24 opérations et avec une quantité d'électricité très faible, une vive étincelle, et une commotion qui se fait sentir jusqu'au coude.

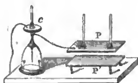


Fig. 997.

M. Gaugain a imaginé une disposition (*fig.* 997) qui, avec les sources donnant rapidement leur tension maximum, permet d'augmenter beaucoup l'effet produit. Il associe un électromètre condensateur c, avec un condensateur de grandes dimensions PP', qu'il charge d'abord; puis il fait communiquer avec le plateau de l'électromètre, le plateau P, le soulève, et fait passer sa charge dans le condensateur c. Cet appareil est très sensible; M. Gaugain ayant chargé directement le condensateur de l'électromètre au moyen d'une source électrique très faible, et ayant soulevé le plateau c, vit les feuilles d'or diverger de 7 à 8° au plus. Ayant ensuite chargé le même instrument, par l'intermédiaire du condensateur PP', les feuilles d'or vinrent frapper les colonnes de décharge, ce qui exigeait un écart de 90°.

III. Effets de la décharge électrique.

1326. Quand les deux électricités se combinent à travers des corps qui ne lui livrent pas un passage assez libre, soit parce qu'ils sont mauvais conducteurs, soit parce qu'ils ne présentent pas de dimensions suffisantes, il se produit divers effets que nous allons examiner, maintenant que nous connaissons le moyen d'obtenir de fortes décharges au moyen des divers condensateurs. On considère cinq sortes d'effets : *effets physiologiques*, *effets physiques*, *effets mécaniques*, *effets chimiques*, et *effets magnétiques*.

1327. I. EFFETS PHYSIOLOGIQUES. — Les effets physiologiques sont ceux que l'on produit sur les êtres organisés. Le premier à signaler est la commotion que produit la décharge, quand elle a lieu à travers une partie du corps. L'expérience se fait ordinairement avec la bouteille de Leyde ; mais il faut remarquer qu'on peut, comme Cuthberson l'a reconnu, éprouver une commo-

tion aussi forte, en tirant d'une main une étincelle d'un conducteur à grande surface, pendant que l'autre main communique avec le sol par un fil de fer. Souvent on donne la commotion en même temps à plusieurs personnes formant la *chaîne* (1314). Si elles étaient isolées, elles éprouveraient toutes la même secousse; quand elles ne sont pas isolées, et qu'elles sont en grand nombre, celles du milieu de la *chaîne* sont un peu moins éprouvées que les autres, parce qu'une partie des électricités passe dans le sol, par les jambes de celles qui sont plus rapprochées du condensateur. — D'après Arago, il y a des personnes qui interrompent la communication, comme le ferait un corps isolant; cela tient probablement à l'épaisseur et à l'état de sécheresse exceptionnelle de l'épiderme de leurs mains.

Carreau fulminant. — On fait quelquefois l'expérience au moyen du *carreau fulminant.* Cet instrument consiste en une vitre encadrée, sur les deux faces de laquelle on a appliqué des feuilles d'étain qui ne vont pas jusqu'au cadre. On charge ce condensateur à la manière ordinaire, et si une personne veut essayer de prendre un petit objet métallique placé sur ce carreau, elle en est empêchée par la contraction brusque du bras due à la commotion qu'elle reçoit, étant en communication avec l'armature opposée par l'intermédiaire du sol. Quand la surface d'un condensateur dépasse 5 ou 6 décimètres carrés, la commotion se fait sentir jusque dans la poitrine, et devient dangereuse.

Quand on se sert de batteries à grande surface, on peut tuer des animaux. Pour faire l'expérience, on place l'animal sur un plateau conducteur communiquant avec l'armature extérieure de la batterie, et l'on fait communiquer, au moyen de l'excitateur, quelques points de son corps avec l'armature intérieure. Au moment de l'explosion, l'animal fait un mouvement convulsif et tombe mort. La batterie doit présenter une surface d'autant plus grande que l'animal est de plus forte taille; mais il faut aussi reconnaître l'influence de l'espèce. Les reptiles résistent beaucoup mieux aux fortes décharges que les animaux à sang chaud. Ainsi, Prietsley a vu des grenouilles, même très petites, supporter impunément les plus fortes décharges d'une batterie de 2^m carrés, qui était plus que suffisante pour tuer un chat. La grande batterie du Musée Teyler, à Harlem, depuis les additions qui y ont été faites, présente 550 pieds carrés, ou 58 mètres carrés de surface garnie. La décharge qu'elle donne est vraiment effrayante; elle est capable de tuer un bœuf.

Quand on tire avec la main une étincelle d'une forte machine, on éprouve aussi une commotion aux articulations du poignet et du bras, et même dans la poitrine; l'électricité dégagée par influence, et attirée dans la main et le bras, se combinant en partie dans l'intérieur des membres, avec le fluide qui l'attire. De plus, l'électricité refoulée dans le sol rentrant brusquement dans le corps, au moment de l'explosion, on ressent une autre commotion dans les articulations des pieds et des genoux. L'observateur placé sur un tabouret isolant éprouve aussi la commotion dans les régions du corps voisines du point d'où l'on tire une étincelle. Une étincelle de 35 à 40 centimètres de longueur

commence à être dangereuse, surtout si elle est grosse, ce qui dépend de l'étendue des conducteurs que l'on décharge (1207). On peut tuer des animaux avec l'étincelle des fortes machines. Dès 1744, le P. Gordon obtenait, au moyen de cylindres de résine qu'il faisait tourner avec un archet, des étincelles capables de tuer de petits oiseaux.

1328. Choc latéral ou choc en retour. — Quand on approche la main d'un conducteur fortement chargé, on peut ressentir une secousse dans le bras, au moment où un autre observateur décharge ce conducteur. C'est qu'il s'est fait une décomposition par influence dans le fluide neutre du bras, et les électricités séparées s'y recombinent, au moment où le conducteur est déchargé. Il se produit un effet analogue, quand on décharge une batterie à travers un long fil servant d'excitateur; un électromètre placé près de ce fil s'agite au moment de la décharge. Ces effets, connus sous le nom de *choc latéral*, *choc en retour*, peuvent s'observer sur les membres d'une grenouille fraîchement tuée, que l'on suspend par des conducteurs près d'une machine, dont on tire des étincelles, une des pattes communiquant avec le sol par un fil métallique. Les membres éprouvent un mouvement convulsif à chaque décharge.

On a cherché à tirer parti de la commotion électrique, pour guérir certaines maladies. Deux ou trois ans après l'expérience de Leyde, on essayait déjà de guérir les paralysies au moyen de la commotion produite par de simples étincelles, ou par la décharge de la bouteille. Nous reviendrons sur ce sujet quand nous ferons connaître d'autres principes, sur lesquels sont basées les méthodes pratiques que l'on emploie aujourd'hui.

1329. II. EFFETS PHYSIQUES. — Les effets physiques consistent en inflammations, fusions et volatilisations de diverses substances.

Inflammation de matières combustibles. — Quand on tire une étincelle avec le doigt, on n'éprouve pas de sensation de chaleur; la plus forte étincelle n'a même aucune influence à distance sur les thermoscopes les plus sensibles. Ce n'est pas à dire pour cela que l'étincelle ne soit pas accompagnée de chaleur, et ces résultats négatifs doivent être attribués au peu de durée du phénomène. En effet, quand l'étincelle passe à travers des substances combustibles, elle peut les enflammer. Gordon paraît avoir, le premier, fait cette observation; Ludolff enflamma l'éther en 1744; Winkler, l'eau-de-vie et la poudre de Lycopode; Gralath ralluma une bougie qu'il venait de souffler, en faisant passer une étincelle à travers la mèche; Boze parvint à mettre le feu à de la poudre.

La plus petite étincelle suffit pour enflammer l'éther. Pour en faire l'expérience, on met ce liquide dans un vase métallique, et l'on fait tomber une étincelle en un point mouillé par l'éther. On rend l'expérience plus frappante en faisant jaillir l'étincelle, du doigt d'une personne montée sur un tabouret isolant (*fig.* 998), ou bien en plaçant le vase sur la machine électrique et lui présentant le doigt. Watson causa une grande surprise en enflammant de l'éther au moyen d'une étincelle provoquée par un morceau de glace.

Les corps solides peuvent être enflammés par de fortes étincelles fournies par une machine électrique ou par une batterie. Du linge à demi brûlé, de l'amadou, de l'étoupe saupoudrée de résine ou de soufre, s'allument assez facilement. Ingenhousz se procurait du feu en déchargeant une bouteille de Leyde sur du coton saupoudré de résine. Pour enflammer la poudre, on en remplit une petite cartouche en papier *ac* (*fig.* 999), dans laquelle on enfonce deux tiges métalliques qui ne se joignent pas. On fait partir la décharge entre ces tiges, en les mettant en communication avec les deux armatures d'une batterie, et l'on fait en sorte qu'elle ne soit pas trop brusque, soit en terminant l'excitateur par une pointe, soit en forçant le fluide à passer par un conducteur imparfait, comme une corde mouillée. Si l'on mêle de la limaille de fer à la poudre, l'expérience réussit plus facilement.



Fig. 998.

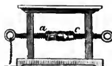


Fig. 999.

En Autriche, on a appliqué l'étincelle à l'inflammation des fourneaux de mine. Des machines électriques portatives à deux plateaux et sans conducteurs, servent à charger des bouteilles de Leyde, dont la décharge passe à travers un mélange de *sulfure d'antimoine* et d'*oxychlorate de potasse*, plongé dans la poudre. Le mélange communique avec l'armature intérieure de la bouteille par un fil isolé, au moyen d'une enveloppe en gutta-percha, et avec l'armature extérieure, par le sol. On a pu par ce moyen produire l'explosion à des distances de 11 kilomètres, sur 50 fourneaux à la fois; sous l'eau, les expériences ont réussi, même par le brouillard, la pluie, la neige[1].

Pistolet de Volta. — Les mélanges gazeux explosifs s'enflamment sous l'influence de la plus petite étincelle. On en fait l'expérience au moyen du *pistolet de Volta* (*fig.* 1000), qui consiste en un vase en métal dans lequel entre une tige métallique *bc*, mastiquée et isolée dans un tube de verre, et dont l'extrémité intérieure est très rapprochée de la paroi du vase. Si l'on fait communiquer le vase avec le sol, et le bouton *b* avec un corps électrisé, l'étincelle jaillit dans l'intérieur entre l'extrémité de la tige et la paroi du vase, et si ce vase est rempli d'un mélange gazeux explosif, la détonation a lieu, et le bouchon qui ferme l'ouverture par laquelle on introduit les gaz est lancé au loin. Ordinairement, on remplit le pistolet de Volta de gaz hydrogène et l'on souffle dans l'intérieur pour y introduire de l'air. On donne à ce petit instrument une foule de formes différentes, mais qui n'offrent aucun intérêt scientifique.



Fig. 1000.

Eudiomètre de Volta. — Cet instrument, en usage dans les laboratoires

[1] *Bibl. de Genève* (arch. des sc., 1856), t. XXXII, p. 59.

de chimie, sert à étudier la composition des gaz. Un cylindre en verre *t* (*fig.* 1001), terminé par des viroles à robinet *r*, *r'* est surmonté d'une petite cuvette, et repose sur un pied en forme d'entonnoir. La virole supérieure communique avec le sol, et en *o* se trouve un petit appareil à étincelle semblable à celui du pistolet de Volta. — Supposons, par exemple, que, sachant que l'eau est composée d'oxygène et d'hydrogène, on veuille connaître dans quelles proportions ces gaz se combinent. On commence par remplir entièrement l'eudiomètre d'eau ; puis, le robinet supérieur étant fermé, on y introduit sous l'eau des volumes égaux d'hydrogène et d'oxygène, mesurés dans un tube gradué. On fait jaillir l'étincelle, en approchant du bouton *o*, le plateau d'un électrophore ; et l'on voit une vive lumière produite par la combinaison des gaz, dont il reste une partie. Pour connaître la nature de ce reste, on visse sur la cuvette supérieure un tube plein d'eau T, et ouvrant le robinet *r*, on y fait passer le gaz restant. On ferme ensuite le robinet *r*, on dévisse le tube T, et, le fermant avec le pouce, on le transporte dans la cuve à eau. On reconnaît que le gaz occupe un volume égal au quart de celui du mélange introduit, et que c'est de l'oxygène pur ; d'où l'on conclut que l'eau est formée de 1 volume d'hydrogène et de $\frac{1}{2}$ volume d'oxygène.



Fig. 1001.

Briquet électrique. — Si l'on fait jaillir une étincelle à travers un jet de gaz hydrogène, il s'enflamme aussitôt. Volta a tiré parti de cette propriété pour construire un briquet à gaz hydrogène (*fig.* 1002) disposé d'une manière analogue à celui que nous avons déjà décrit (I, 383); seulement le jet de gaz est enflammé par l'étincelle électrique. L'eau acidulée par l'acide sulfurique, dégage, au contact du zinc *z*, du gaz hydrogène, dont la force élastique fait monter le liquide, par le tube T, dans le vase V ; après quoi le zinc n'est plus mouillé par le liquide, et le gaz cesse de se produire. Ce gaz peut s'échapper par le tube à robinet R. Dans une boîte, qui sert de socle à l'appareil, est renfermé un petit électrophore électrisé P*r*, dont le plateau P est toujours chargé ; une petite bande d'étain placée sur le bord de la résine *r*, le faisant communiquer avec le sol, pour le débarrasser de son fluide négatif. Le plateau P peut être soulevé par le cordon de soie *s* ; il vient alors toucher en *o* une tige isolée *t'*, lui communique son électricité, et une étincelle jaillit entre le bouton qui termine la tige *t'* et un autre bouton fixé à l'extrémité d'une tige *t*,

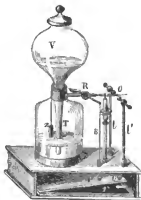


Fig. 1002.

en communication avec le sol. Si un jet de gaz hydrogène sort au même moment par le robinet R, il s'enflamme, et allume une petite bougie dont la mèche se trouve sur son passage. Or, le mouvement par lequel on ouvre le robinet R entraîne le cordon *s*, et soulève le plateau P; de sorte que l'étincelle jaillit, en même temps que le gaz s'échappe. L'électrophore peut rester chargé pendant plusieurs mois, quand on a soin de tenir bien fermée la boîte qui le contient, et d'y mettre quelques fragments de chaux vive.

1330. Fusion de fils et feuilles métalliques. — Quand on fait passer la décharge d'une batterie à travers un fil métallique assez fin pour que le fluide éprouve un grande résistance, ce fil s'échauffe, fond ou se volatilise, suivant la force de la batterie. Franklin a fondu ainsi des feuilles minces d'or ; plus tard, Beccaria et surtout Prietsley, fondirent des fils. M. Faraday nomme *décharge conductive*, celle qui se fait à travers un fil conducteur, et *décharge disruptive*, celle qui a lieu à travers un corps mauvais conducteur, comme l'air, une lame de verre, de carton.

Excitateur universel. — Pour fondre des fils métalliques, on emploie l'excitateur universel (*fig.* 1003), imaginé par Henley. Deux tiges *ac*, *a'c'* (*fig.* 1003), pouvant glisser dans des tubes *a*, *a'* isolés sur des colonnes de verre, sont terminées par des pointes sur lesquelles on peut visser des boules creuses *c*, *c'*. *t* est une tablette destinée à supporter les objets à travers lesquels on veut faire passer la décharge. La tige *ca*, étant en communication avec l'armature extérieure d'une batterie, on fait communiquer l'autre tige *c'a'*, avec l'intérieur, au moyen de l'excitateur.

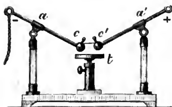


Fig. 1003.


Fig. 1004.

On peut encore attacher à la tige *c'a'*, une chaîne dont l'autre bout est fixé à une boule fixée à un manche isolant, et avec laquelle on touche l'armature intérieure. La décharge passe alors entre les deux boules *c*, *c'*.

Pour faire fondre un fil métallique, on le fixe entre les boules *c*, *c'*; au moment de l'explosion, on le voit sauter en globules, ce qui s'explique par la tendance des cylindres liquides à se diviser en sphérules (1,265). Quand la décharge est très forte, le fil est réduit en vapeur et disparaît. Plus ce fil est fin, plus il est facilement fondu : ce qui se conçoit bien, chaque point de la section recevant d'autant plus d'électricité qu'elle est plus petite. Il faut aussi que le fil soit court quand on ne dispose que de faibles charges; autrement il ralentit la décharge, et l'action étant moins brusque, elle est moins efficace.

Avec les grandes batteries du Musée Teyler et du Conservatoire des Arts-et-Métiers de Paris, on peut fondre un fil de fer de 15 à 20 mètres. La fusion peut s'opérer dans l'eau, au moyen de l'appareil (*fig.* 1004), le fil *f* est tendu

par le poids d'une boule, qui en touche une autre fixée au pied de l'instrument, et l'on met les deux extrémités de ce dernier en communication avec les armatures d'une batterie. Le fil doit être plus fin et moins long que lorsqu'on opère dans l'air, à cause de la perte de chaleur due au contact de l'eau, et du passage d'une partie de l'électricité à travers ce liquide.

Des feuilles d'or, d'argent, d'étain sont aussi fondues ou volatilisées. On découpe dans une feuille d'or une ellipse *o* (*fig.* 1005), et on la fait tenir entre deux conducteurs A, B, en la faisant traverser par l'électricité venant en *m* d'une machine électrique ; on la voit en même temps tourner rapidement sur elle-même. Si alors on fait passer la décharge d'une batterie entre les deux conducteurs, la feuille d'or est volatilisée sur place.

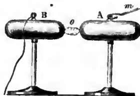


Fig. 1005.

Les métaux oxydables aux plus hautes températures, comme l'acier, le fer, le zinc, l'étain..., se transforment en oxydes, que l'on peut recueillir en parcelles microscopiques sur une feuille de papier, ou qui se dispersent dans l'air en légers flocons. Le meilleur moyen d'observer ces oxydes consiste à mettre la feuille de métal entre deux lames de verre serrées l'une contre l'autre, et sur lesquelles l'oxyde se dépose.

Cuthberson a fait beaucoup d'expériences sur la fusion des métaux par la décharge. Il opérait dans un tube analogue à celui de la *fig.* 1004, seulement il y avait, à la partie inférieure, un robinet par lequel on pouvait introduire divers gaz. Dans l'azote et l'hydrogène, le métal ne donne qu'une poussière métallique. Dans l'air, il peut s'oxyder, et l'on reconnaît l'absorption de l'oxygène, en ajustant un tube au robinet inférieur, que l'on ouvre après le refroidissement, pendant que le tube est plongé dans l'eau. Dans l'air des fils des métaux suivants :

plomb, *étain*, *zinc*, *fer*, *cuivre*, *platine*, *argent*, *or*,

ont donné des poussières présentant les couleurs suivantes :

gris, *presque blanc*, *id.*, *brun*, *id.*, *noir*, *id.*, *pourpre*.

Un fil d'acier, traversé par des décharges de plus en plus fortes, devient successivement bleu, jaune, rouge à sa surface, puis il entre en fusion.

Presse électrique. — Si l'on applique un ruban de satin blanc sur un fil d'or fixé entre les tiges de l'excitateur universel, l'or est volatilisé par la décharge, et il dépose sur le ruban une bande brune formée par de l'or très divisé. Singer a tiré parti de ce résultat pour imprimer des dessins sur la soie. On découpe des jours dans une carte, de manière à former un dessin (*fig.* 1006), et on l'applique sur un ruban de satin blanc ; par dessus, on étend une feuille

d'or qui touche deux lames d'étain *e*, *e'*, et que l'on assujettit au moyen de bandes de carton *m*, *n*, que l'on rabat par dessus. Le tout est comprimé entre les tablettes *aa'*, *b* de la *presse électrique* (*fig.* 1007), et l'on fait passer la décharge à travers la feuille d'or. Le métal est volatilisé, et se dépose sur la soie à travers les découpures de la carte.



Fig. 1006.

1331. Anneaux de Priestley. — La décharge électrique produit la fusion superficielle de corps en masses. Quand on décharge la batterie du Musée Teyler, sur le bord d'une de ses jarres, le verre est fondu à la surface, sur une largeur de plus de 1 centimètre. Priestley a remarqué des traces de fusion sur des boules métalliques frappées par plusieurs décharges d'une batterie de 40 pieds carrés[1]. Au milieu, était une tache circulaire, et autour un ou plusieurs anneaux concentriques séparés par des intervalles de 3mm. Sur des plaques de métal, ces anneaux étaient formés de points brillants et de petites cavités présentant des indices de fusion, et les intervalles qui les séparaient étaient recouverts d'une poussière noire non adhérente. Les métaux les plus fusibles donnent généralement le plus grand nombre d'anneaux avec la même décharge. Souvent aussi les anneaux présentent de vives couleurs [1].

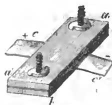


Fig. 1007.

1332. Résistance différente des divers métaux. — Priestley avait remarqué que, de deux fils métalliques égaux en diamètre et en longueur, placés l'un à la suite de l'autre et traversés par la même décharge, un seul est fondu, et c'est le moins bon conducteur. Ainsi, le platine et le fer fondent plus facilement que l'or et l'argent. Van-Marum a trouvé que l'ordre des métaux, d'après la résistance au passage de l'électricité, est le suivant : *plomb*, *étain*, *fer*, *or*, *argent*, *cuivre*, ce dernier résistant le moins.

M. Harris a trouvé que la fusion se fait plus difficilement dans le vide, une partie des électricités passant autour du fil : par exemple, un fil que ne pouvait fondre dans le vide la décharge d'une batterie de 25 pieds carrés, fut facilement fondu dans l'air par une batterie de 5 pieds. Il résulte de ces faits, que l'électricité agit d'autant mieux qu'elle éprouve plus de résistance dans son passage. L'existence d'une semblable résistance est d'ailleurs facile à prouver : si l'on fait passer la décharge à travers un fil fin, il peut arriver qu'elle ne soit pas complétement déchargée. En se servant d'un fil fin en guise d'excitateur, et ayant soin de ne toucher l'armature que pendant un temps aussi court que possible,

[1] *Hist. de l'électricité* t. III, p. 328, et *Ann. de ch. et de ph.* (2e série), XXXIV, p. 292.

on trouve qu'il faut y revenir à 4 à 5 fois pour obtenir la décharge complète. Enfin, si l'on fait passer la décharge à travers un fil sinueux, l'étincelle saute souvent d'une sinuosité à l'autre, à travers l'air, ce qui prouve que ce milieu lui résiste moins que le fil métallique.

Si la résistance à la décharge conductive en augmente les effets, il faut néanmoins qu'elle ne soit pas assez grande pour interrompre totalement le passage de l'électricité; alors il n'y aurait pas, évidemment, d'effet calorifique. C'est pour cela que les mauvais conducteurs, placés tout près des fils que l'on fond par la décharge, ne sont pas altérés. Par exemple, la dorure d'une bande de bois, d'un cordon de soie, peut être volatilisée par la décharge, sans que la bande et le cordon soient altérés.

1333. Lois de l'échauffement des fils. — L'échauffement d'un fil métallique par l'effet de la décharge, dépend de sa nature, de sa longueur, de son diamètre et de la charge de la batterie. Cuthberson a trouvé, ce qui a été confirmé depuis par des moyens plus précis, que l'échauffement était proportionnel au carré de la charge; il déduisait la charge, de la tension de l'électricité libre; et l'effet calorifique, de la longueur maximum de fil qui pouvait être fondue. M. Harris, à la suite d'expériences faites avec un appareil thermométrique analogue à celui de la *fig.* 1008, avait cru pouvoir admettre que l'effet calorifique ne dépendait que de la quantité absolue d'électricité contenue dans la batterie, et non de son état de condensation. Mais M. Riess[1] est arrivé à des résultats tout différents. Voici d'abord l'instrument thermométrique dont il s'est servi.

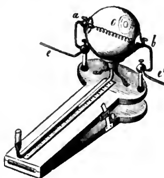


Fig. 1008.

Thermomètre électrique.— Un ballon (*fig.* 1008) suivi d'un tube capillaire de 45 centimètres de longueur, communiquant par son extrémité avec un tube vertical assez gros, porte trois tubulures. Deux de ces tubulures, *a* et *b*, laissent passer un fil de platine enroulé en hélice, à travers lequel on fait passer la décharge en mettant les tiges *e e'* en communication avec les armatures d'une batterie. La troisième tubulure, *o*, sert à introduire une colonne liquide dans le tube; on la ferme ensuite hermétiquement, au moyen d'un bouchon à vis. Le tube peut s'incliner plus ou moins. La sensibilité de l'instrument est d'autant plus grande qu'il est moins incliné sur l'horizon. Quand la décharge traverse le fil de platine, ce fil s'échauffe et fait dilater l'air; on néglige la perte de chaleur due au contact des parois, et l'on calcule l'échauffement du fil au

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LXIX, p. 129.

moyen du déplacement absolu du liquide, en se servant d'une formule assez compliquée.

La quantité d'électricité renfermée dans la batterie, s'évalue au moyen de la bouteille électrométrique (1320). Dans cet appareil, la spirale en platine t (*fig.* 992) est destinée à amortir le choc de la décharge pour éviter que les boules ne soient altérées à leur surface, ce qui changerait la valeur de l'unité de mesure adoptée. En représentant la quantité d'électricité par e, et par s la surface armée de la batterie, $e : s$ représente ce que M. Riess appelle la *densité électrique*, c'est-à-dire l'état de condensation de l'électricité sur l'unité de surface.

Influence de la batterie. — L'échauffement du fil dépend à la fois de la quantité d'électricité et de l'état de condensation, c'est-à-dire que si l'on accumule la même quantité d'électricité dans un nombre différent de jarres, l'échauffement produit n'est pas le même ; il augmente quand le nombre de jarres diminue. Ce résultat doit être attribué à la plus grande rapidité de la décharge, qui n'est pas instantanée, comme nous l'avons vu (1332), quand elle a lieu à travers un fil très fin.

Au moyen d'une batterie dont les jarres avaient 16 décimètres carrés de surface garnie, et dont il faisait varier le nombre de 2 à 25, M. Riess a trouvé que l'*échauffement d'un fil est proportionnel au carré de la quantité d'électricité, et en raison inverse de la surface armée de la batterie*. En appelant t cet échauffement, e la quantité d'électricité, et s la surface garnie, on aura donc $t = n\frac{e^2}{s}$; n est une constante qui représente l'échauffement correspondant à $e = 1$ et $s = 1$. Cette formule peut s'écrire $t = ne(e : s)$. On peut donc dire aussi que l'échauffement est proportionnel au produit de la quantité d'électricité par sa densité. Si l'on admet, ce qui est la supposition la plus simple, que le temps θ de la décharge est en raison inverse de la densité électrique δ, on aura $\theta = n'\frac{e}{\delta}$. Or, $\delta = \frac{e}{s}$; donc , $\theta = n's$. En remplaçant s par $\frac{\theta}{n'}$ dans la valeur de t, elle devient $t = \mathrm{N}\frac{e^2}{\theta}$, N étant le résultat de la combinaison des constantes n et n'.

Longueur et diamètre du fil. — Si l'on fait varier la longueur du fil, en ayant soin d'introduire dans le circuit un excitateur universel portant un fil identique à celui du thermomètre et tel que la somme des longueurs des deux fils soit toujours la même, on trouve que la longueur particulière du fil du thermomètre n'a pas d'influence sur son échauffement. Ce qui pouvait se prévoir, chaque molécule étant traversée par la même quantité d'électricité pendant le même temps ; et d'où il résulte que la quantité de chaleur développée est proportionnelle à la longueur. Mais si l'on augmente la longueur du fil du thermomètre, sans rien changer au reste du circuit, on trouve que l'échauffement diminue ; c'est que la résistance étant augmentée, la décharge

est ralentie. Cela nous explique pourquoi un fil fond d'autant plus facilement qu'il est plus court.

Si l'on compare deux fils de diamètre différent, il faut encore avoir soin d'opérer avec un circuit toujours composé de la même manière. Pour cela, les deux fils sont placés l'un dans le thermomètre, l'autre dans l'excitateur. Aprés avoir observé l'échauffement du premier, on les change de place et l'on observe l'échauffement du second. M. Riess a trouvé ainsi que l'*échauffement est en raison inverse de la 4e puissance du diamètre du fil.* Ce qui revient à dire qu'il est proportionnel à la quantité d'électricité qui passe par une molécule, et en supposant que toutes les molécules d'une section en reçoivent également. En effet, les quantités d'électricité e, e' qui passent par une molécule, de deux fils de diamètre d, d', sont en raison inverse des sections ou des carrés des diamètres ; on a donc $e : e' = d'^2 : d^2$. Mais on a aussi, en appelant t et t' les échauffements, $t : t' = e^2 : e'^2$, d'aprés la loi relative aux charges. En combinant ces deux proportions , il vient $t : t' = d'^4 : d^4$.

Dans toutes ces expériences, on n'a pas à tenir compte des parties du circuit autres que les fils que l'on compare, la section de ces parties étant relativement très grande et ne produisant pas de résistance sensible.

En réunissant les lois qui précédent, on peut représenter l'échauffement t d'un fil par la formule $t = ke^2 : d^4 s$, dans laquelle la constante k dépend de la substance du fil.

Effet du ralentissement de la décharge. — L'échauffement du fil invariable du thermomètre est d'autant plus faible que le fil de l'excitateur qui fait partie du circuit est plus fin et plus long. L'échauffement paraît être en raison inverse de la longueur et proportionnel au carré du diamétre de ce fil. Ce résultat est dû à la résistance qu'il oppose au passage de l'électricité ; en effet, des obstacles divers, comme des tubes pleins de liquide, des morceaux de bois mouillés, des interruptions dans le fil, susceptibles d'être franchies par l'*électricité*, diminuent l'échauffement en ralentissant la décharge, à laquelle ils peuvent donner une durée appréciable. M. Riess a trouvé que le retard est proportionnel à la résistance du conducteur intercalé, et que l'échauffement est réciproquement proportionnel à la durée de la décharge. En désignant par λ et ρ la longueur et le diamétre du fil de l'excitateur, par b une constante, et supposant qu'il n'y a pas d'autre résistance sensible dans le circuit, l'échauffement est représenté par la formule générale $t = K\frac{e^2}{d^4 s} : \left(1 + \frac{b\lambda}{\rho^2}\right)$.

Comparaison des pouvoirs conducteurs des métaux. — M. Riess a comparé les résistances, et par conséquent les conductibilités de divers métaux, en les substituant les uns aux autres dans l'excitateur, en tenant compte de leur longueur et de leur diamétre, d'aprés les lois précédentes. Il a trouvé ainsi que, en représentant par 100 la longueur d'un fil de cuivre, des fils des autres métaux devraient avoir les longueurs qui suivent, pour produire la même résistance sous le même diamétre :

Argent,	*cuivre,*	*or,*	*cadmium,*	*laiton,*	*palladium,*	*fer,*	*platine,*	*étain,*	*nickel,*	*plomb.*
148,7	100	88,9	38,35	27,7	18,18	17,6	15.52	14,7	13,15	10,31

De plus, avec ces longueurs relatives, ces fils dégageraient la même quantité de chaleur, si on les supposait placés les uns au bout des autres, et traversés par la même décharge. Leur élévation de température serait donc en raison inverse de leur chaleur spécifique et de leur densité, la longueur n'ayant pas d'influence, comme nous l'avons vu.

Nous expliquerons plus tard comment, au moyen des décharges continues de la pile galvanique, on peut comparer par d'autres méthodes, la conductibilité des divers métaux, et nous verrons qu'on arrive à des lois analogues à celles qui précèdent. M. Clausius est parvenu à expliquer les lois trouvées par M. Riess, au moyen de la théorie mécanique de la chaleur. Il remarque qu'une décharge est un mouvement de fluides dont les particules agissent les unes sur les autres, et, appliquant les principes de la mécanique analytique, il trouve que la variation des forces vives n'est pas nulle. Cependant l'état initial et l'état final sont des états d'équilibre des fluides ; il faut donc que la force vive développée se retrouve quelque part ; elle est représentée par la chaleur dégagée, et, en en cherchant la valeur, on retrouve les lois de M. Riess[1].

1335. Effets d'induction. — M. Riess a encore reconnu qu'un fil voisin de celui qui laisse passer la décharge, peut la ralentir quand il est moins bon conducteur que lui. Pour que l'effet soit sensible, il faut que le fil de décharge soit roulé en spirale, ainsi que l'autre, de manière que les longueurs en présence soient très grandes. Il faut, de plus, que les deux bouts du fil indépendant de la batterie, se joignent de manière à former un *circuit fermé*. Il y a évidemment un effet d'induction dans le circuit, dont l'électricité réagit sur celle qui passe dans le fil de décharge ; aussi, le ralentissement est-il d'autant plus prononcé que le fil induit est moins bon conducteur[2].

M. Knochenhauer a fait aussi un long travail sur les effets d'induction dans des fils voisins, et sur les quantités de chaleur développées dans plusieurs fils servant simultanément à décharger une même batterie. Il se servait d'un thermomètre électrique analogue à celui que nous avons décrit plus haut[3].

1336. III. EFFETS MÉCANIQUES DE LA DÉCHARGE. — Nous rappellerons d'abord l'ébranlement produit dans les fluides que traverse l'étincelle, qui nous a servi à expliquer le bruit qui l'accompagne (1283), et qui peut être assez violent dans les liquides pour briser des vases.

Si l'on place une lame isolante ou imparfaitement conductrice entre les deux boules de l'excitateur universel, elle est brisée ou percée par la décharge d'une batterie suffisamment puissante. L'étincelle d'une forte machine électrique peut

[1] *Pogg. ann.* t. LXXXVI, p. 337, et *Ann. de ch. et de ph.*, 3e série, XXXVIII, p. 200.
[2] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. X, p. 417.
[3] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XVII, p. 77.

produire les mêmes effets : celle que donne la machine du Musée Teyler peut percer de part en part un livre de 192 feuillets.

Perce-verre. — Quand on veut percer une lame de verre, on emploie souvent le *perce-verre* (*fig.* 1009) : la lame *v* est placée sur un cylindre en verre et entre deux pointes isolées l'une de l'autre. On met sur la lame, une goutte d'huile destinée à empêcher l'électricité de se disperser. Quand on a fait passer la décharge entre les pointes, au moyen des boutons *a* et *b*, la lame est percée. Le trou est rond, à peine étoilé, à contours mats, et quelquefois il reste rempli de verre en poudre. Il faut une puissante batterie pour percer une lame de $\frac{1}{2}$ millimètre d'épaisseur.

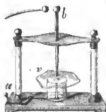


Fig. 1009.

Perce-carte. — Pour percer une feuille de carton, on emploie le *perce-carte* (*fig.* 1010), qui est disposé de manière à mettre en évidence deux résultats curieux. On fait partir l'étincelle entre les pointes *a* et *c* qui sont isolées l'une de l'autre, et la carte, placée très obliquement, comme le montre la figure, se trouve percée. Les bords du trou, *o*, sont relevés sur les deux faces de la carte. On explique ce résultat par la décomposition par influence qui se fait dans la carte, de manière qu'il y a en réalité deux étincelles partant de l'une et l'autre face pour aboutir à la pointe qui est du même côté. On remarque, de plus, que le trou *o* n'est pas à la même distance des deux pointes ; il est beaucoup plus rapproché de la pointe négative. Si même on fait d'avance un trou à égale distance des pointes, la décharge ne le traverse pas. La présence de l'air intervient dans ce phénomène singulier. Tremery, qui l'a remarqué le premier, a vu dans l'air raréfié, le trou se rapprocher du milieu à mesure que la pression était plus faible. Si l'on met la carte entre deux pointes horizontales plus élevées l'une que l'autre, on voit, dans l'obscurité, un trait lumineux qui rase la carte et va de la pointe positive à la pointe négative, en face de laquelle se forme le trou. Pour expliquer ces faits, on a coutume de dire que le fluide positif se transporte plus rapidement à travers l'air, que le fluide négatif; de sorte que, faisant plus de chemin dans le même temps, le point de la carte où se joignent les fluides est plus rapproché de la pointe négative.

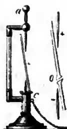


Fig. 1010.

Corps brisés ou altérés. — Quand on fait passer la décharge à travers un morceau de bois dans le sens des fibres, en engageant dans ses extrémités les pointes de l'excitateur universel, il éclate en plusieurs morceaux. Van-Marum, au moyen d'une batterie de 15 mètres carrés, a fendu en deux un cylindre de buis ayant 81^{mm} de diamètre et de hauteur. Les tiges de l'excitateur s'enfonçaient dans des trous pratiqués dans les bases, de manière à se

trouver à 27^{mm} l'une de l'autre. La force développée équivalait à près de 3000 kil.

Si l'on fait passer la décharge à travers une feuille d'or placée entre deux lames de verre chargées de poids, l'or est volatilisé, et les plaques souvent brisées en mille fragments. Un fil de fer très fin, tendu dans un tube de verre, le brise aussi au moment où il est réduit en poussière, si ce n'est quand ce fil est enveloppé de papier. Quand le fil est entouré d'eau ou d'huile, remplissant le tube, le choc est extrêmement violent, et l'on peut briser ainsi des canons de pistolet.

Si l'on pose les deux boules *c*, *c'* de l'excitateur (*fig.* 1003) sur une lame de papier, ou de verre très mince, bien desséchée, et étendue sur la tablette *t*, cette lame est déchirée ou brisée par une très forte décharge. Quand la lame de verre n'est pas brisée, elle présente des traces d'altérations superficielles qui se voient en la portant au jour, ou au moins en troublant sa transparence par insufflation. Les figures obtenues ainsi sont connues sous le nom de *figures roriques*. Ce phénomène, étudié par M. Riess et par M. Peyré, se produit facilement au moyen d'étincelles rasant la surface du verre, comme dans la figure 951. M. Riess a reconnu que, si la décharge est violente, le verre est comme dépoli avec du sable ; de plus, il est devenu conducteur sur les traces visibles et sur les parties voisines qui se distinguent par le souffle. M. Wartmann a vu la décharge produire sur le mica des effets encore plus prononcés, d'une grande régularité, et accompagné de couleurs. M. Riess a pu distinguer des figures roriques sur une lame de mica présentée simplement à l'aigrette fournie par une pointe.

Changements de longueur des fils. — Nairne ayant fait passer plusieurs décharges d'une batterie de 3 mètres carrés, à travers un fil de fer non tendu, de 270 millimètres de long et de 3^{mm} de diamètre, trouva qu'il s'était raccourci de $\frac{1}{10}$, après 15 décharges ; le diamètre avait un peu augmenté. Une 16e décharge le fit fondre. Un fil de cuivre donna des résultats semblables. M. E. Becquerel a fait de nombreuses expériences sur ce sujet [1]. Il a trouvé, sur des fils de platine, que le raccourcissement était en raison inverse du cube du diamètre. A la 3e ou 4e décharge, le fil, qui n'était tendu que par un faible poids comme dans la *fig.* 919, prenait une forme ondulée, et les ondulations allaient en augmentant sans changer de place, quand on multipliait les décharges.

1337. Phénomènes de transport. — M. Peyré a vu une colonne liquide introduite dans un tube capillaire traversé par la décharge, se porter à l'extrémité par laquelle arrivait le fluide négatif, et revenir ensuite lentement sur ses pas.

Quand la décharge passe entre deux boules métalliques, il y a des parcelles enlevées et transportées d'une boule à l'autre. Ce fait, observé d'abord par Muschenbroeck et Brugnatelli, a été étudié en détail par M. Fusiniéri [2].

[1] *Comptes-rendus des séances de l'Académie des sciences* de Paris, t. VIII, p. 496.

[2] *Archives de l'électricité*, par M. De la Rive, t. III, p. 597.

Il vérifia d'abord que la décharge d'une bouteille de Leyde, reçue sur une plaque d'argent, y dépose une petite tache jaune provenant de son bouton de cuivre. Il fit ensuite passer la décharge d'une batterie munie d'un bouton d'argent, à travers un disque de cuivre de 9 centimètres de diamètre et de $\frac{1}{5}$ de millimètre d'épaisseur; ce dernier était tenu par un manche de verre et appliqué contre la boule de cuivre de l'excitateur. Les deux faces du disque présentèrent des cavités dans lesquelles on distinguait des parcelles d'argent. Il y en avait aussi sur la boule de l'excitateur, et la boule d'argent présentait des traces de fusion et était tachée par de l'oxyde de cuivre. — Dans une autre expérience, une boule d'or fut placée sur la batterie, et un disque d'argent isolé fut appliqué sur cette boule. La décharge, partant du disque d'argent, fut reçue par la boule, aussi en argent, de l'excitateur; la face du disque opposée à la boule d'or présenta une belle tache jaune de plusieurs centimètres de diamètre. La boule d'argent présenta aussi des traces d'or, et la boule d'or, des traces d'argent. Ces traces d'or disparaissent peu à peu, comme si l'or se volatilisait. Le disque d'argent ayant été placé à égale distance des deux boules, présenta, après la décharge, des taches d'or égales sur ses deux faces. M. Fusiniéri explique ces faits par le transport de l'argent ou de l'or à travers le disque interposé; il attribue même à l'entraînement des particules, les perforations des corps traversés par la décharge. Mais ne pourrait-on pas penser que, le disque étant d'un petit diamètre, l'électricité a pu, en partie, l'envelopper et franchir ses bords en transportant, à travers l'air, les parcelles d'or ou d'argent aux points où on les trouve? Il serait nécessaire de répéter ces expériences avec des disques de grandes dimensions et entourés d'une substance isolante,

Les parcelles emportées par l'étincelle expliquent, suivant Hales, les différentes couleurs qu'elle présente d'après la nature des corps d'où on la tire : par exemple, sur le fer, l'étincelle est blanche; sur le cuivre, verte: sur le charbon, jaune; sur l'ivoire ou le buis, cramoisie. Une orange placée entre les deux boules de l'excitateur universel paraît enveloppée, pendant la décharge, d'une atmosphère lumineuse d'un beau rouge orangé.

La force qui détache les parcelles métalliques superficielles n'est autre, probablement, que la répulsion qui s'exerce entre elles, jointe à l'état de vapeur dans lequel les met la quantité énorme d'électricité qui les saisit. Priestley a fait une expérience qui vient à l'appui de cette explication. Ayant fait passer une forte décharge à travers une chaîne de fer étendue sur une lame de verre, il vit chaque chaînon se dessiner sur le verre, au moyen d'une poudre noire qui s'en était détachée, et la chaîne avait un peu diminué de poids. Une partie de cette poudre faisait corps avec le verre. Si l'on frotte une médaille avec de la plombagine, de manière que les traits en creux en restent remplis, et qu'on la fasse traverser par une forte étincelle après l'avoir posée sur une feuille de papier, les traits de la médaille s'impriment sur le papier, par la plombagine qui se détache des creux.

1338. Déplacements par choc latéral. — Priestley, en cherchant à imiter certains effets de la foudre, a reconnu que des corps situés près du point où a lieu une forte décharge peuvent être vivement déplacés. Ainsi, des morceaux de liége, de bois, sont chassés à plusieurs pouces de distance. Le résultat a lieu, mais avec moins de force, quand la décharge traverse un fil fin, même quand il n'est qu'échauffé. Priestley explique ces phénomènes par la commotion de l'air; de sorte que la cause serait la même que celle qui chasse la balle du mortier électrique (130). Mais, comme il l'a constaté lui-même, de la poudre renfermée dans une fiole s'agite au moment de l'explosion; et dans le vide, l'effet latéral est peu affaibli, et ne paraît pas augmenté dans l'air comprimé. M. Pouillet attribue ces déplacements brusques à la décomposition par influence, qui se fait avec une telle instantanéité et une telle énergie, que les corps, dont la conductibilité est imparfaite, sont entraînés par les fluides qui ne peuvent se déplacer dans leur intérieur avec une rapidité suffisante.

1339. IV. EFFETS CHIMIQUES DE LA DÉCHARGE. — Si l'on fait passer une série d'étincelles dans une éprouvette placée sur le mercure et remplie des gaz suivants : *gaz oléfiant*, *acide sulfhydrique*, *acide chlorhydrique*, *protoxyde d'azote*, *gaz ammoniac*, *phosphure d'hydrogène*, ils sont décomposés, et leurs éléments séparés. L'*acide carbonique* se décompose en oxyde de carbone et oxygène. Ces décompositions, connues des anciens physiciens, ont été particuliérement étudiées par Van-Marum. La décharge peut aussi décomposer les substances isolantes qu'elle traverse : l'éther, les huiles grasses, les huiles essentielles, comme l'a constaté Morgan, un des premiers. Les huiles donnent du gaz oléfiant, de l'hydrogène et de l'oxygène. L'étincelle peut aussi produire des combinaisons : Priestley a trouvé qu'une série d'étincelles à travers l'air, fait diminuer son volume et lui communique la propriété de rougir la teinture de tournesol ; Cavendish a reconnu qu'il se forme de l'acide azotique, par la combinaison d'un peu d'oxygène et d'azote. L'inflammation des mélanges gazeux explosifs n'est pas à citer ici, parce que l'étincelle agit, dans ce cas, comme le ferait une flamme.

Dans la fusion d'un fil de laiton, le zinc et le cuivre sont séparés, et on peut les trouver à l'état d'oxyde, sur une lame de verre. Une série d'étincelles à travers de l'oxyde d'étain renfermé dans un tube de verre, fait apparaître l'étain sur la surface du tube. Le vermillon dépose, dans les mêmes circonstances, le soufre et le mercure qui le composent.

A. Pinaud appliqua sur un carreau étincelant (1286) une feuille de papier enduite de bromure ou d'iodure d'argent, sur laquelle il posa une lame de verre, et, ayant fait passer à travers le carreau la décharge d'une bouteille de Leyde, il vit des taches brunes, sur le papier, aux point correspondants aux étincelles, et obtint ainsi des dessins, qu'il nomma *électrographies*.

1340. Décomposition avec transport des éléments. — Dans les expériences que nous venons de citer, les éléments disjoints restent mélangés ; on peut les obtenir séparés et transportés en différents points. Dans plusieurs

essais, Wollaston et M. Bonijol avaient obtenu la séparation des éléments, mais les résultats n'étaient pas parfaitement nets. M. Faraday a réussi de la manière la plus complète : 1° ayant posé sur une lame de verre, une goutte d'une dissolution de sulfate de cuivre, dans laquelle il engagea les extrémités de fils de platine communiquant, l'un avec le conducteur positif d'une machine de Nairne, l'autre avec le pôle négatif, ou avec le sol [1], il trouva, après 20 tours de la machine, le fil négatif entièrement recouvert de cuivre. De l'iodure de potassium mélangé d'amidon donna promptement autour du fil négatif la couleur bleue qui atteste la présence de l'iode.

2° On fait jaillir une série d'étincelles d'une machine *positive*, sur l'extrémité d'une bande de papier humide imbibée de sulfate de soude et colorée avec du sirop de violettes ; la bande rougit à cette extrémité, et devient verte à l'autre qui communique avec le sol. Or, nous savons que les acides rougissent le sirop de violettes et que les alcalis le font passer au vert; les éléments du sel ont donc été transportés séparément aux extrémités de la bande de papier. Si l'on applique, sur une lame de verre V (*fig.* 1011), une série de losanges du même papier, et qu'on fasse arriver de l'électricité *positive* par une pointe isolée *p*, pendant que la pointe *n* communique avec le sol, on voit les losanges rougir du côté de la pointe *p*, et verdir à l'extrémité opposée. On voit que l'électricité a dû traverser l'espace qui sépare les losanges; mais il faut que le passage ait lieu sans étincelles. — Si le papier n'est imbibé que de sirop de violettes, les couleurs peuvent encore apparaître aux extrémités, à cause des sels que contient le papier.



Fig. 1011.

Décomposition de l'eau. — De fortes décharges à travers l'eau en décomposent quelques parcelles. Wollaston est parvenu à obtenir des résultats au moyen de faibles décharges, en ayant soin de faire arriver l'électricité en un seul point, afin que toute son énergie s'exerçât sur quelques molécules seulement. Pour remplir cette condition, il engagea dans un tube de verre, un fil d'or terminé en pointe très effilée, fondit le verre autour de la pointe, puis usa l'extrémité du tube jusqu'à ce qu'il vit apparaître le bout du fil. Le tube fut ensuite plongé dans de l'eau communiquant avec le sol, et des étincelles furent lancées sur l'extrémité extérieure du fil. Aussitôt un petit courant de bulles gazeuses s'échappa de la pointe d'or. — Wollaston a encore opéré ainsi : il remplit un tube capillaire de chlorure d'or, fit déposer l'or dans l'intérieur, en chauffant, et tira ensuite le tube à la lampe, de manière à obtenir une pointe très fine contenant intérieurement un fil d'or, par lequel il fit ensuite sortir

[1] Il faut que la communication avec le sol soit bien intime. M. Faraday faisait communiquer le fil avec les tuyaux de conduite du gaz ou des eaux; il appelle ce système de conduites *appareil de décharge*.

l'électricité à travers l'eau. Wollaston a décomposé, par le même moyen, du sulfate de cuivre dissous dans l'eau.

Dans ces expériences, les éléments de l'eau sont mélangés. M. Armstrong en a obtenu la séparation, au moyen de la machine hydro-électrique de l'Institut polytechnique de Londres (900), et de l'appareil (*fig.* 1012). L'eau remplit le vase V, et les tubes *t*, *t'*, dont la partie supérieure est traversée par un fil de platine scellé dans le verre. Un des fils communique avec la chaudière de la machine, et l'autre avec le sol. On voit l'oxygène se dégager seul autour du fil *t*, qui apporte l'électricité positive, et l'hydrogène autour du fil *t'*. Nous verrons, en parlant de la décomposition de l'eau par le courant de la pile, comment on peut expliquer la séparation des deux gaz.

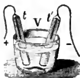


Fig. 1012.

Quand on se sert d'une machine électrique ordinaire, les gaz séparés sont en si faible quantité, qu'ils sont entièrement dissous par l'eau. M. Andrews a pu cependant les recueillir, en employant des tubes capillaires ne contenant que très peu d'eau qui était bientôt saturée de gaz, et dans lesquels les gaz étaient mesurés sur une échelle. Une machine à plateau a dégagé 0,066 millimètres cubes d'oxygène, après 40 tours faits en 1 minute. M. Andrews a pu aussi opérer avec l'électricité de l'atmosphère, recueillie au moyen d'un *cerf-volant électrique*, par un procédé que nous décrivons plus loin. Par un temps serein, il a obtenu en une heure 0,054 millimètres cubes d'oxygène [1].

1341 Ozone. — Quand on fait passer une série d'étincelles à travers de l'oxygène pur, ce gaz exhale une odeur particulière, et prend des propriétés chimiques nouvelles. Cet oxygène, ainsi modifié par l'électricité, a reçu de M. Schœnbein le nom d'*ozone*. Nous reviendrons plus tard sur les propriétés de ce produit singulier.

1342. V. Effets magnétiques. — L'électricité agit d'une manière remarquable sur les corps magnétiques; mais ce n'est que plus tard que nous pourrons étudier en détail cette action. Nous citerons seulement quelques résultats. Franklin parvint à aimanter de petites aiguilles d'acier, par la décharge d'une bouteille de Leyde, et à intervertir les pôles d'une aiguille aimantée. Beccaria, Cavallo, Wilson, obtinrent des résultats semblables, soit en faisant passer la décharge à travers l'aiguille, soit en la plaçant très près de l'étincelle. Enfin, Kinnersley ayant placé une aiguille aimantée, suspendue sur un pivot, très près d'un fil de fer, la vit pirouetter rapidement au moment où il fit passer la décharge à travers ce fil.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e s., t. X, p. 105; et t. L, p. 124.

§ 5. — DE LA PROPAGATION DE L'ÉLECTRICITÉ DANS LES GAZ ET LES MAUVAIS CONDUCTEURS.

I. Passage de l'électricité à travers les gaz.

1343. DÉPERDITION PAR LE CONTACT DE L'AIR. — Coulomb a laissé sur ce sujet des résultats importants obtenus au moyen de sa balance électrique. Il produisait d'abord un certain écart de l'aiguille de cet instrument, au moyen d'une balle électrisée, et isolée complétement par une tige de gomme laque (1292); puis, l'écart diminuant peu à peu par la déperdition due au contact de l'air, il le ramenait à sa première valeur, de 3 minutes en 3^m, en diminuant la torsion au moyen du micromètre supérieur ; et il évaluait les pertes d'électricité, par les diminutions qu'il fallait faire subir à l'angle de torsion. Par ce moyen, Coulomb est arrivé aux résultats suivants : 1° la déperdition augmente avec le degré d'humidité ; 2° pour un même état de l'air, la déperdition est proportionnelle à la tension ; d'où il résulte que le rapport de la quantité perdue à la quantité totale est constant. Cette dernière loi n'est autre chose que la loi de Newton, relative à la chaleur (II,748). Nous verrons (1344) jusqu'à quel point elle est exacte.

Pour vérifier cette seconde loi, on mesure l'angle de torsion a, puis cet angle, a', après un temps t, pour les mêmes distances des deux balles de la balance. Si t est très petit, $\frac{a-a'}{t}$ représentera la diminution de torsion dans l'unité de temps. La torsion moyenne pendant le temps t étant $\frac{1}{2}(a+a')$, $\frac{2(a-a')}{t(a+a')}$ représentera la *perte*, rapportée à l'unité de tension. Ce rapport a été trouvé le même à toutes les époques de l'expérience, mais il changeait avec l'état hygrométrique de l'air.

En partant de la loi qui nous occupe, on peut calculer la quantité d'électricité qui reste sur un corps au bout d'un temps donné, quand on connaît la quantité initiale, et la valeur de p qui correspond aux circonstances de l'expérience. En effet, comme pour la chaleur (II,781), les pertes forment une progression géométrique décroissante, quand les temps forment une progression arithmétique croissante, on a donc

[1] $a' = am^{-t}$; d'où $\log a' = \log a - t \log m$ [2]

m représente le rapport $a' : a$, pour $t = 1$; il faut l'exprimer en fonction de p. Or, si nous prenons la dérivée en signe contraire de la valeur de a' par rapport à t, nous aurons la diminution de torsion pendant l'unité de temps, en supposant la charge constante, et nous trouverons $am^{-t} l.m$, ou $a' l.m$, à cause de [1]. En supposant la charge égale à 1, ou $a' = 1$, la dérivée devient

$l.m$, et représente alors la valeur de p. Nous avons donc $l.m = p$, ou, en passant aux logarithmes des tables, $\log m = l.m . \log e = p\frac{1}{M}$ en représentant le module par M. Remplaçant $\log m$ par cette valeur dans [2] il vient

$$[3] \qquad \text{Log}\, a' = \log a - \frac{tp}{M}; \qquad \text{d'où} \qquad \log e' = \log e - \frac{tp}{2M}, \qquad [4]$$

en représentant par e et e' les quantités d'électricité qui correspondent aux torsions a et a'. En effet, les angles de torsion étant proportionnels aux forces répulsives, et celles-ci étant proportionnelles aux carrés des quantités d'électricités, on a $a = ke^2$, $a' = ke'^2$, k étant une constante.

1344. Expériences de M. Matteucci[1]. — La plupart de ces expériences ont été faites avec la balance électrique de la *fig.* 1013. Une cloche à trois tubulures est posée sur un plan bien dressé, au centre duquel aboutit un tuyau en plomb t, par lequel on peut faire le vide sous la cloche. La tubulure du milieu reçoit le tube à micromètre qui soutient le fil de torsion auquel est suspendue l'aiguille bm. Cette aiguille porte à l'une de ses extrémités une petite balle creuse en argent doré très mince, préférable à une balle en moelle de sureau, qui est peu conductrice quand elle est sèche. En m est une lame de mica destinée à ralentir les oscillations. La tubulure r sert à introduire différents gaz, venant d'une vessie V, et se purifiant et se desséchant dans des tubes à boules de Liebig. La troisième tubulure est garnie d'une virole fermée hermétiquement, et portant la boule isolée b en argent doré. La même tubulure donne passage à un tube en verre mince traversé par un fil de cuivre ff', pouvant glisser à travers un lut gras, qui s'oppose à la rentrée de l'air. Une assiette remplie de fragments d'acide phosphorique est placée sous la cloche, pour la dessécher; et sur sa surface latérale et à la hauteur de l'aiguille, se trouve un arc divisé. Un fil à plomb g, aide à lire exactement les divisions. Pour électriser les boules, on les met en contact, on enfonce le fil ff' de manière qu'il les touche, et l'on électrise l'extrémité f avec une très petite bouteille de Leyde.

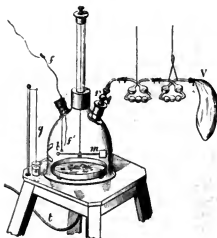


Fig. 1013.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXVIII, p. 386.

La boule de l'aiguille est repoussée; aussitôt on décharge le fil ff', et on le retire le plus possible ; la boule mobile revient alors sur la boule *b*, et partage avec elle son électricité. Voici les lois trouvées par M. Matteucci.

1° *L'agitation de l'air diminue la perte d'électricité.* Pour établir ce résultat inattendu, la boule *b* était retirée de la balance et laissée à l'air libre pendant 10 minutes, soit à l'état de repos, soit à l'état d'oscillation au bout d'un fil de soie, soit exposée au courant d'air d'un soufflet. On la reportait ensuite dans la balance pour constater la perte. Par exemple, la torsion primitive étant de 195° et l'écart de 20°, il fallut, pour conserver cet écart, réduire la torsion à 105°, quand la boule *b* avait séjourné pendant 10 minutes dans l'air en repos, et à 145° quand cet air était agité.

Ce résultat est dû à ce que les molécules de l'air, même le plus sec, enlèvent de l'électricité aux corps, en s'électrisant à leurs dépens, et sont alors repoussées, puis remplacées par d'autres. Or, il faut à ces molécules un certain temps pour recouvrer de l'électricité, à cause de leur mauvaise conductibilité; si donc elles ne séjournent pas au contact des corps, elles n'ont pas le temps de leur enlever de l'électricité; de même qu'une boule de résine ne prend pas d'électricité à un conducteur qu'elle ne fait que toucher un instant, tandis qu'elle s'électrise si le contact a quelque durée.

2° *La déperdition dépend des corps qui sont en présence de la boule pendant son séjour hors de la balance.* Par exemple, pour un écart de 20° et une torsion primitive de 188°, la boule rapportée dans la balance au bout de 10 minutes, a donné une torsion de 164° après avoir été mise en présence d'une sphère électrisée d'une manière opposée; 96° seulement, quand cette sphère avait la même espèce d'électricité; 136°, quand la boule eut séjourné dans un globe creux non isolé; et 105° quand elle eut été abandonnée simplement à l'air libre. On voit que c'est en présence d'une sphère chargée de la même électricité que la déperdition a été plus grande.

3° *Dans l'air et dans les gaz secs et purs, et pour des quantités d'électricité comprises entre certaines limites, la perte d'électricité est constante.* Cette loi est en contradiction avec celle qu'avait trouvée Coulomb; mais ce dernier n'opérait pas dans l'air parfaitement sec.

4° La perte est la même dans l'*air*, l'*hydrogène* et l'*acide carbonique* secs, pris à la même température et sous la même pression.

5° *La nature du corps électrisé n'influe pas sur la perte de l'électricité et sur la loi de cette perte dans les gaz secs.* Coulomb a trouvé que la déperdition était la même sur une balle de moelle de sureau et sur une balle de cire d'Espagne. M. Matteucci est arrivé au même résultat avec une balle métallique, et une balle de gomme laque électrisée par une étincelle.

6° *La perte est la même dans les gaz secs, pour l'électricité vitrée et pour l'électricité résineuse, quand la tension n'est pas trop forte. Pour les fortes tensions, le fluide négatif se perd le plus rapidement.* M. Biot avait trouvé, avec la balance de torsion, les pertes égales pour les deux fluides. M. Belli, en employant

de fortes tensions, avait vu le pendule d'un électromètre de Henley s'abaisser plus vite sur un conducteur négatif que sur un conducteur électrisé positivement.

7° *Dans l'air sec, la perte augmente avec la température.* M. Matteucci s'est borné à étudier la déperdition entre 0° et 20°, la gomme laque cessant d'isoler dès 40 à 50°. Pour faire varier la température de la balance, il l'entourait de deux espèces de demi-manchons, remplis d'un mélange frigorifique ou d'huile chaude, et écartés de quelques centimètres, de manière qu'on pût apercevoir l'aiguille. Nous citerons le résultat suivant : la même quantité d'électricité a été perdue en 278 minutes à 0° ; en 205^m, à 13°,5 ; et en 167^m, à 22°.

8° *La perte de l'électricité dans l'air sec est d'autant plus lente que ce gaz est plus raréfié.* Nous avons déjà vu que l'électricité à faible tension se conserve dans l'air très raréfié (1299). M. Matteucci a repris les expériences de M. Harris sur ce sujet, au moyen d'un appareil différent, et est arrivé aux mêmes résultats. Il a trouvé, comme lui, que la déperdition est *plus lente* dans l'air très raréfié que dans l'air à la pression ordinaire. Par exemple, un petit électroscope à feuilles d'or perdait toute sa charge en 3 ou 4 heures dans l'air sec à la pression de 76^{cm}, et au bout de 2 *jours* seulement, dans l'air raréfié à 3^{mm}. Ce résultat peut s'expliquer par le moindre nombre des molécules d'air qui touchent le corps électrisé. Mais, pour expliquer la conservation de l'électricité dans le vide, il faut invoquer une cause particulière, comme l'adhérence du fluide aux molécules superficielles (1299). Du reste, M. Matteucci explique la perte due à l'air, par la conductibilité du gaz, transportant l'électricité de molécule à molécule, par une sorte de *décharge obscure* analogue à celle qui produit les aigrettes quand la tension est forte. Il n'admet la répulsion des molécules d'air en contact, que lors des fortes charges. Cette opinion est partagée par M. Faraday.

9° *Dans l'air humide, la perte augmente avec la quantité d'humidité ;* mais non en raison du cube du poids de vapeur contenu dans l'air, comme l'avait cru Coulomb. Les expériences ont été faites en remplaçant dans la balance (*fig.* 1013), l'acide phosphorique, successivement par les mélanges d'eau et d'acide sulfurique employés par M. Regnault dans ses recherches sur l'hygrométrie (II,1161). Dans l'air humide, à la pression de 76^{cm} et à la température de 13°, quand la force élastique de la vapeur est comprise entre 0^{mm},134 et 3^{mm},699, la perte d'électricité augmente moins vite que la quantité de vapeur ; et elle lui est proportionnelle de 3^{mm},699 à 9^{mm},991.

Des vapeurs bien desséchées de *camphre*, d'*assa-fœtida*, d'*éther* et de quelques *huiles essentielles* très pures, n'ont pas augmenté la perte de l'électricité dans l'air sec.

1345. RÉSISTANCE DES GAZ A LA DÉCHARGE. — Le passage de l'électricité à travers les gaz, au lieu de se faire lentement, comme nous venons de le considérer, peut se faire subitement, ainsi que cela a lieu dans la décharge disruptive. La *distance* ou *portée explosive* dépend alors de la nature du gaz interposé et de sa densité.

Influence de la densité d'un même gaz. — M. Harris a trouvé que la quantité d'électricité, condensée dans une même jarre, nécessaire pour opérer la décharge entre deux boules placées à une distance constante, est en raison inverse de la densité de l'air. La quantité d'électricité se mesurait au moyen de la bouteille électrométrique (1320). Quand, la densité de l'air restant la même, la distance des deux boules varie, la quantité d'électricité est proportionnelle à la distance explosive. Il en résulte que, si la charge reste la même, la distance explosive est en raison inverse de la densité de l'air. Nous disons la densité et non la pression, parce qu'il résulte des expériences de M. Harris, que la distance explosive reste la même dans l'air froid, et dans l'air chauffé jusqu'à 148° en vase clos, de manière que sa densité ne puisse pas varier. Si le gaz est libre de se dilater, sa résistance diminue.

La *densité électrique* (1333) a aussi une influence sur la distance explosive. M. Knockenhauer et M. Masson, chacun de leur côté, ont trouvé que, pour obtenir la décharge à une même distance, il faut que la densité électrique soit proportionnelle à la densité de l'air.

M. Riess, à la suite de nombreuses expériences, est arrivé au même résultat, et il a représenté la distance explosive, par la formule $D = K\frac{e}{s}$, dans laquelle $e : s$ représente la densité électrique, et K une constante qui correspond à cette densité égale à l'unité. Cette formule permet de calculer la charge e d'une batterie quand on connaît D, s et K. Nous voyons qu'il y a une grande différence entre la résistance à la déperdition, qui augmente quand la densité de l'air diminue, et la résistance à la décharge, qui augmente au contraire avec cette densité ; c'est que, dans ce dernier cas, les molécules doivent être séparées, comme le prouvent les expériences faites avec les corps solides, qui sont percés ou brisés.

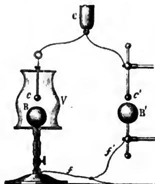


Fig. 1014.

1346. Résistance des divers gaz. — Les différents gaz pris à la même pression, ne résistent pas également à la décharge. Dœbereiner avait remarqué que la distance explosive est moindre dans les gaz les plus denses, et Schaffault l'avait trouvée beaucoup plus grande dans l'hydrogène que dans l'air. Morgan, ayant comparé divers gaz à ce point de vue, a trouvé que la portée explosive est la plus grande dans l'hydrogène, et la plus petite dans l'acide chlorhydrique. M. Faraday a fait un travail étendu sur ce sujet, au moyen de l'appareil de la *fig.* 1014. L'électricité, arrivant d'une machine électrique, se rend sur le conducteur C, d'où elle passe sur les boules isolées c, c'. De là elle peut s'élancer sous forme

d'étincelle sur l'une des boules en cuivre B et B', qui communiquent avec le sol par les fils f, f'. On peut faire varier les distances entre les boules c, B et c', B'. Les premières sont renfermées dans un récipient à boîte à cuir, dans lequel on peut introduire divers gaz. L'expérience se faisait en cherchant quelle distance il fallait donner aux boules c', B' pour que la décharge se fît indifféremment entre elles ou entre les boules c, B, dont la distance restait constante; et les résistances d'un gaz et de l'air étaient en raison inverse des distances B c, B' c'. En prenant pour unité la résistance dans l'air, la distance B c étant de 16mm, la résistance des gaz était $x = D : 16$, D étant la distance B' c' ; et l'on trouva, suivant que les boules c, c' recevaient de l'électricité positive ou de l'électricité négative, les nombres qui suivent :

	hydrogène,	*gaz d'éclairage,*	*oxygène,*	*azote,*	*a. carbonique,*	*gaz oléfiant.*	*a. chlorhydrique.*
(+)	0,597	0,790	0,815	0,992	1,032	1,020	1,782
(—)	0,444	0,847	0,823	1,040	0,952	1,177	1,161

Il résulte de ce tableau que les différences dans les résistances ne tiennent pas seulement à la densité des gaz, mais aussi à leur nature, car le gaz oléfiant résiste mieux à la décharge que l'oxygène et l'acide carbonique, qui sont plus denses que lui. Du reste, ces chiffres ne sont qu'approximatifs, à cause de l'imperfection du procédé. De plus, des causes très légères, comme un peu d'humidité, un peu de poussière, peuvent modifier la distance explosive. On remarque aussi qu'une fois que l'étincelle a franchi la distance des boules B, c ou B', c' on peut les écarter sans qu'elle cesse de se produire, comme si l'air avait été modifié par les premières décharges, de manière à résister moins à celles qui suivent. Ce fait général a été expliqué par M. Faraday, en admettant que les molécules de l'air sont constituées par la première décharge, dans un état de polarité électrique favorable au passage des électricités.

Remarquons encore que l'étincelle n'est pas rectiligne et ne mesure pas la distance des boules, et enfin que les parois du récipient s'électrisent plus ou moins. Aussi la résistance étant 1 et c' B', M. Faraday l'a trouvée égale à 1,121 dans l'air du récipient, avec l'électricité positive, et à 1,024 avec le fluide négatif. Ces causes d'erreur expliquent aussi pourquoi M. Masson a trouvé des nombres plus grands que ceux qui sont cités plus haut, en opérant sur l'hydrogène et l'acide carbonique au moyen de l'électricité positive. Ce dernier physicien a aussi opéré sur quelques liquides; il a trouvé les résistances 7,4; 12,3; 13; 15,5; dans l'éther, l'eau, l'alcool et l'essence de térébenthine.

1347. Différence de résistance aux deux fluides. — Nous avons encore ici à faire la distinction entre la décharge lente, et la décharge par explosion. Nous avons vu que le fluide négatif se perd plus vite par le contact de l'air, pour les fortes tensions, que le fluide positif (1344); cela résulte aussi des apparences des aigrettes formées avec les deux espèces d'électricité (1387).

Quand il s'agit de l'explosion, le contraire a lieu, et le fluide positif traverse plus facilement l'air, en le divisant, que le fluide négatif; l'expérience du perce-carte (1336), nous en a déjà donné une preuve. Si l'on fait partir une étincelle entre deux boules égales, il n'y a aucun moyen de juger du plus ou moins de facilité des fluides en présence, à traverser l'air; mais si l'une des boules, plus petite que l'autre, favorise la sortie du fluide (1392), cette influence sera plus sensible sur le fluide qui traverse le plus facilement l'air, et l'étincelle jaillira à une plus grande distance quand ce fluide arrivera par la plus petite des deux boules. M. Faraday, puis M. Becquerel, ont fait beaucoup d'expériences à ce sujet. M. Becquerel, ayant armé les conducteurs d'une machine de Nairne, de boules ayant, l'une 18^{mm} de diamètre, et l'autre 75^{mm}, l'étincelle partit à 65^{mm} de distance, quand la plus petite recevait l'électricité positive, et à 29^{mm} seulement, quand elle recevait le fluide négatif. Quand la petite boule était fixée au conducteur d'une machine électrique positive, et que la grosse était en communication avec le sol, l'étincelle avait $12^{cm},5$; dans le cas inverse, elle n'avait que $4^{cm},5$.

Les gaz autres que l'air présentent aussi une résistance différente aux deux fluides, comme le montre le tableau précédent, et l'on voit que les uns laissent passer le plus facilement le fluide positif arrivant par la petite boule, les autres le fluide négatif.

II. De la propagation de l'électricité dans les corps solides isolants.

1348. Déperdition de l'électricité par les solides isolants. — Coulomb s'est occupé de ce sujet, avec sa sagacité accoutumée. Pour évaluer la déperdition d'une balle électrisée, par la tige cylindrique qui la soutenait, il mesurait la perte totale, au moyen de la balance de torsion, et en retranchait la perte due à l'air, calculée au moyen des lois qu'il avait établies, et en partant d'une observation préalable donnant la déperdition correspondante à l'état de l'atmosphère. Il est évident que la tige devait isoler incomplétement, si ce n'est quand il faisait cette dernière observation.

Coulomb a reconnu, par cette méthode, que la perte par un support est d'autant plus petite qu'il est plus mince et plus long. Ce qui se conçoit facilement, puisqu'alors il y a moins de points livrant passage à l'électricité, et plus d'espace résistant à franchir. Pour une même substance et pour un diamètre donné, il y a une longueur minimum qui isole complétement. Cette longueur, pour chaque substance, est proportionnelle au carré de la charge électrique; l'électricité de la machine du Musée Teyler ne peut être retenue par des colonnes de verre de $1^{m},53$ de hauteur, ni par des cordons de soie de 14 mètres, tant la tension est forte. La gomme laque est la substance qui isole le mieux; une tige de 1^{mm} de diamètre, et de 40 à 45^{mm} de longueur, isole complétement, pour des charges modérées. Un cordon de soie de même

grosseur doit avoir dix fois cette longueur, pour donner le même résultat. Un fil de soie très fin, trempé dans la cire d'Espagne bouillante, de manière à former une baguette de $\frac{1}{2}$ millimètre de diamètre et de 15 à 16^{cm} de longueur, isole aussi complètement. Un fil de verre doit présenter les mêmes dimensions, quand l'air est bien sec, ou quand il est préservé de l'humidité par une couche de vernis.

1349. Pénétration de l'électricité dans les corps isolants. — M. Faraday et M. Matteucci [1] ont fait beaucoup d'expériences sur la propagation de l'électricité dans les corps isolants. Ils ont reconnu que le fluide ne se répand pas seulement à leur surface, mais qu'il pénètre aussi dans leur intérieur, à une profondeur plus ou moins grande dépendant de leur nature et de la quantité d'électricité fournie. Par exemple, on électrise un gros cylindre d'acide stéarique, en appuyant une de ses bases sur le conducteur d'une machine électrique; on enlève ensuite tout signe d'électricité, soit en posant cette base sur un plateau métallique, soit en en fondant la surface dans la flamme de l'alcool. Si l'on touche alors la base avec une lame métallique non isolée, on trouve bientôt à la surface, de l'électricité venant des parties intérieures. Un cylindre de soufre qui a reçu de l'électricité positive, puis du fluide négatif, reste d'abord électrisé négativement à sa surface; mais au bout d'un certain temps, on y trouve du fluide positif, qui est venu de l'intérieur.

Quand deux charges électriques contraires sont répandues sur les deux faces d'une lame isolante, comme dans le condensateur, les fluides pénètrent encore plus profondément, sous l'influence de leur attraction mutuelle. Pour le prouver, on garnit de feuilles d'étain les deux faces d'une lame de *spermaceti* de 3 ou 4^{cm} d'épaisseur, on charge le condensateur ainsi formé, on enlève les feuilles d'étain, et les deux faces de la lame isolante restent chargées d'électricités contraires. Si alors on enlève les électricités superficielles au moyen de la flamme d'alcool, on les voit reparaître au bout de quelque temps. Si, ayant replacé les armatures, on recharge le condensateur *en sens contraire*, et si l'on enlève ensuite les armatures, on trouve de l'électricité positive sur la face de la lame qui a reçu en dernier lieu ce fluide; mais au bout de quelque temps, on le trouve remplacé par de l'électricité négative venue de l'intérieur, où la première opération l'avait fait pénétrer. Un changement analogue se produit sur l'autre face. Ces expériences réussissent également avec des lames de verre minces, si l'on a soin de conserver longtemps les charges électriques, comme l'a aussi reconnu M. Belli.

M. Matteucci a encore procédé au moyen de grosses masses de *spermaceti* qu'il garnissait d'armatures, et qu'il chargeait faiblement, mais pendant très longtemps. Ayant ensuite brisé ces masses au moyen de lames de verre, il put reconnaître que les fragments étaient chargés de fluide positif ou de fluide négatif, suivant qu'ils étaient détachés à une certaine profondeur au-dessous

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXVII, p. 133.

de la face positive ou de la face négative. Le *spermaceti*, ou blanc de baleine, convient particulièrement pour ces sortes d'expériences, parce qu'il isole assez imparfaitement.

1350. Quantités d'électricité enlevées par une lame isolante. — M. Matteucci a fait de nombreuses expériences sur ce sujet, au moyen d'une balance de torsion (*fig.* 1015), dans laquelle on peut introduire, par dessous, la lame isolante *l*, fixée à une tige de verre portée par un pied *c*. Quand les deux boules électrisées *o* et *a* sont écartées de 30° et en repos, on applique la lame *l* par son centre contre la boule *o*, pendant 5 minutes, puis on la retire. On trouve alors que l'écart des boules *a* et *o* a diminué, ce qui montre que la lame *l* a emporté une partie de l'électricité de la boule *o*. En agissant sur le micromètre *m*, de manière à diminuer la torsion du fil, on ramène l'écart à 30°, et le rapport entre les quantités d'électricité de la boule *o* avant et après le contact de la lame *l*, est donné par celui des angles de torsion.

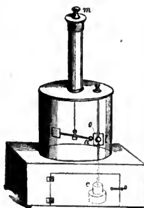


Fig. 1015.

Voici les principaux résultats trouvés par cette méthode : 1° la quantité d'électricité enlevée par une lame isolante à une boule métallique électrisée, est plus grande que celle qui serait proportionnelle à la charge de cette dernière, et la dépasse d'autant plus que cette charge est plus grande. 2° Pour une même charge, la quantité enlevée est plus grande avec la lame la plus mince et la moins étendue, et ce résultat est d'autant plus prononcé que la charge est plus forte. 3° La diminution dans la quantité enlevée quand l'épaisseur augmente, n'est pas proportionnelle à l'augmentation d'épaisseur.

Il résulte de là que la forme d'un corps qui touche une boule métallique électrisée, a une grande influence, à égalité de masse, sur la quantité de fluide qu'il lui enlève. Par exemple, une lame de soufre de 25 centimètres carrés de surface et de 2^{mm} d'épaisseur enlève, en 5 minutes, 4 fois plus d'électricité environ, à une boule métallique, quand elle la touche par son contour arrondi, que lorsqu'elle la touche par le centre d'une de ses faces. La même masse de soufre, mise sous la forme d'un petit cylindre de 40^{mm} de long, terminé par une pointe par laquelle elle touche la boule, lui enlève encore plus d'électricité pendant le même temps.

Influence de la substance de la lame. — Le soufre et la gomme laque enlèvent à peu près les mêmes quantités d'électricité, mais le verre en enlève beaucoup plus que ces deux corps. Les différentes espèces de verre agissent aussi d'une manière différente. Il suffit qu'une même lame de verre

ait été chauffée et refroidie dans de l'air plus ou moins sec, ou que l'état de sa surface ait été modifié, pour qu'elle produise successivement des effets différents. Si l'on enduit une lame de verre, de couches de gomme laque sur ses deux faces, la perte qu'elle produit diminue à mesure que le nombre de couches augmente, et finit par être égale à celle que produirait une lame formée entièrement de gomme laque. Avec les charges qu'employait M. Matteucci, la couche de vernis devait avoir une épaisseur de $\frac{1}{4}$ de millimètre pour qu'il en fût ainsi. Une lame d'étain, recouverte de couches de gomme laque assez épaisses pour que l'électricité ne pût les traverser, se comportait aussi comme une plaque formée seulement de gomme laque.

Influence de la température. — Une très petite augmentation de température suffit pour diminuer notablement le pouvoir isolant des corps. Ainsi, la boule fixe de la balance de Coulomb, complètement isolée par une tige de gomme laque de 1^{mm} de diamètre et de 45^{mm} de longueur, quand la température est de 15 à 20°, ne l'est plus qu'imparfaitement à 22°. La chaleur a plus d'influence sur la gomme laque que sur le soufre; c'est vers 13° que leur pouvoir est sensiblement le même. M. Matteucci ayant enveloppé une boule métallique électrisée, avec deux hémisphères creux pratiqués dans les deux moitiés d'un cube en gomme laque, trouva que la perte de la boule était exprimée, à 13°,8, par la fraction $\frac{1}{57}$; et dans un moule semblable en soufre, par $\frac{1}{51}$; la perte dans l'air sec pendant le même temps étant égale à $\frac{1}{357}$. Mais à la température de 35°, cette perte fut de $\frac{1}{21}$ dans le moule de gomme laque, et de $\frac{1}{40}$ seulement dans le soufre.

1351. Différence entre les deux fluides. — Il résulte d'expériences faites avec les deux espèces d'électricité, que le fluide négatif passe plus facilement que le fluide positif, d'une boule électrisée, sur une plaque de soufre ou de gomme laque qui la touche.

Figures de Leichtenberg. — Une expérience ancienne montre la différence de propagation des électricités sur les matières résineuses. On prend un plateau de résine bien uni et à l'état neutre, et l'on dépose sur sa surface, au moyen du bouton d'une bouteille de Leyde que l'on tient par la panse, de l'électricité positive, suivant des lignes quelconques. On répète cette opération, mais en suivant d'autres lignes, après avoir chargé l'intérieur de la bouteille, d'électricité négative. On a ainsi, sur la résine, des lignes électrisées positivement, et d'autres négativement. On projette alors sur la résine ainsi préparée, un mélange de poudres fines de minium et de soufre, au moyen d'un petit soufflet dans lequel on les a introduites. Les deux poudres s'électrisent en passant par la tuyère du soufflet; le soufre, qui est électrisé négativement, se porte sur les courbes électrisées positivement, et le minium sur celles qui ont reçu le fluide négatif. On a donc des bandes jaunes et des bandes rouges. Ce qu'il y a de remarquable, c'est que les bandes jaunes présentent des ramifications multipliées et divergentes, tandis que les rouges ont des contours unis; ce qui indique une différence dans la manière dont les fluides déposés successi-

vement par la bouteille, se sont propagés à la surface de la résine. C'est là l'expérience célèbre des *figures de Leichtenberg*, expérience qui produisit une vive sensation, parce qu'elle mettait en évidence un nouveau caractère distinctif entre les deux électricités.

1352. CONDUCTIBILITÉ SUPERFICIELLE DES CRISTAUX. — Nous avons annoncé (I, 416) que la forme plus ou moins symétrique des cristaux doit être en rapport avec les propriétés physiques qu'ils présentent dans différentes directions, et nous avons vu de quelle manière l'expérience confirme cette prévision, pour l'*élasticité* (I, 659), la *conductibilité calorifique* (II, 815), et la *dilatabilité* (II, 839). On est porté naturellement à penser que la conductibilité électrique d'un même cristal dans différentes directions doit aussi être en relation avec l'arrangement moléculaire qu'indique sa forme. Aussi, différents essais ont-ils été faits à cet égard, mais d'abord sans succès. MM. d'Hausmann et Henrici ont reconnu cependant que le *diopside* conduit le mieux l'électricité dans le sens de son axe cristallographique, et la *diallage*, dans le sens parallèle à ses clivages. M. de Senarmont a complétement tranché la question par la méthode ingénieuse suivante [1]. Il recouvre la face du cristal, d'une feuille d'étain présentant une large ouverture circulaire à contours bien nets, obtenue avec un emporte-pièce. Cette feuille d'étain, collée avec une dissolution claire de gélatine ou de vernis, se replie de manière à envelopper tout le cristal. Au centre de la partie circulaire découverte, s'appuie normalement l'extrémité d'une pointe isolée, par laquelle on fait arriver de l'électricité. Ce fluide s'échappe de la pointe en rayonnant, et glisse sur la surface découverte, pour gagner les bords de la feuille d'étain, qui communique avec le sol. Dans ses premiers essais, M. de Senarmont faisait passer l'électricité par explosion, au moyen d'une petite batterie, et l'étincelle laissait sur la surface du cristal une trace permanente de son passage pouvant indiquer par sa forme, le sens de la plus facile transmission; mais l'action était trop brusque et trop énergique pour que de faibles différences pussent être distinguées. M. de Senarmont eut alors l'idée d'opérer dans l'air raréfié sous un récipient, et de faire arriver par la pointe, un flux continu d'électricité positive qui se répand sur la surface du cristal et se voit, dans l'obscurité, sous l'apparence d'une lueur violacée. Cette lueur part de la pointe, en formant une couche lumineuse d'une certaine épaisseur, qui se produit encore quand l'extrémité de la pointe se trouve à une petite distance de la surface, à 1^{mm}, par exemple. Cette lueur s'épanouit régulièrement sur les surfaces homogènes; mais sur celles qui présentent une direction de plus facile transmission, elle affecte la forme d'une ligne diamétrale lumineuse, un peu épanouie à ses extrémités, et dans laquelle on distingue un courant de fluide partant du centre. Cette bande lumineuse oscille un peu autour de sa position d'équilibre; on la rend souvent plus stable en laissant à l'air du récipient une certaine tension. Quand cette tension est assez grande,

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXVIII, p. 257.

on voit des étincelles jaillir à travers la lueur violacée, et l'on peut en conserver la trace sur de la fleur de soufre dont on saupoudre la surface.

Les deux électricités présentent des résultats très différents : le fluide négatif donne toujours des lueurs sensiblement uniformes. Des stries légères, des altérations superficielles modifiant les résultats, surtout si la force directrice est faible, il faut, autant que possible, employer des faces naturelles ou obtenues par clivage. Les stries naturelles des cristaux n'ont pas d'influence, à moins qu'elles ne soient très prononcées.

Voici maintenant les résultats donnés par l'expérience :

1° Sur les surfaces homogènes, comme des lames de verre, de gutta-percha, ou de soufre, de gomme laque, de résine coulées sur une glace polie, la pointe est entourée d'une lueur uniforme. Si l'on dépolit une partie de la surface avec du papier de verre, la lueur est quelquefois plus vive dans cette partie. Si l'on moule du soufre, de la gomme laque, sur des surfaces de cristaux rugueuses ou striées naturellement, la conductibilité ne présente pas de différences sensibles dans les divers sens; à moins que les stries ne soient de véritables cannelures serrées et profondes, comme sur certains cristaux de fer oxydulé dodécaèdre : du soufre coulé sur de semblables surfaces paraît laisser passer l'électricité plus facilement dans le sens des stries.

2° Les cristaux du système régulier se comportent comme les corps homogènes; la conductibilité est la même en tous sens et sur toutes les faces.

3° Les cristaux du 2e et 3e système cristallin, qui sont symétriques autour d'un axe, offrent une conductibilité égale en tout sens, sur les faces normales à l'axe. Sur les faces obliques à l'axe, il y a une direction de conductibilité maximum, tantôt perpendiculaire, tantôt parallèle à la projection de l'axe sur ces faces.

4° Une face quelconque des cristaux des autres systèmes présente une direction de conductibilité maximum. Quand la face contient un ou deux axes de symétrie, cette direction lui est perpendiculaire ou parallèle.

Ces lois ont été trouvées au moyen de 36 substances différentes. Quelques résultats ont été douteux, mais aucun contradictoire.

M. Wiedemann a fait aussi des expériences suivies sur la conductibilité superficielle d'une douzaine de cristaux, à peu près à la même époque que M. de Senarmont[1]. Il procédait en saupoudrant la surface, d'une poussière fine peu conductrice, comme du lycopode ou du minium; puis, faisant arriver par une pointe, l'électricité positive du bouton d'une bouteille de Leyde, il voyait la poudre s'éloigner de la pointe dans toutes les directions, de manière à laisser un espace à découvert. Si la lame était homogène, cet espace était circulaire; mais sur les faces de certains cristaux, il prenait la forme d'une ellipse dont le grand axe avait deux ou trois fois la longueur du petit. Ici encore on constate les différences d'effets des deux électricités : car le fluide négatif ne donne que des figures très petites et mal définies.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXIX, p. 227.

III. Polarisation des corps diélectriques. Pouvoir inductif.

1353. Polarisation dans les corps mauvais conducteurs. — Quand un corps mauvais conducteur est soumis à l'action d'un corps électrisé, il prend un état électrique intérieur dans lequel ses molécules présentent les électricités contraires en deux points opposés de leur masse. Cet état électrique est analogue à l'état magnétique que prend le fer doux sous l'influence d'un aimant (1200), et il en résulte deux pôles électriques analogues aux pôles des aimants. Cet état, qui est passager comme celui du fer doux, a été découvert par M. Faraday, qui l'a désigné sous le nom de *polarisation électrique*, et par M. Matteucci. Voici comment procède ce dernier physicien : On prend des cylindres en acide stéarique, gomme laque, ou soufre, de 8 à 10mm de longueur et de 2mm d'épaisseur, qu'on suspend par un fil de cocon dans une grande cage de verre bien desséchée, et l'on approche un corps électrisé de l'extrémité d'une de ces aiguilles à l'état naturel. On la voit s'approcher et osciller, comme une tige de fer en présence d'un aimant. On peut reconnaître alors que l'extrémité de l'aiguille la plus rapprochée du corps qui porte l'électricité, est électrisée d'une manière contraire à ce dernier, tandis que l'extrémité opposée est électrisée de la même manière. Quand on enlève le corps, l'aiguille revient ausitôt à l'état neutre.[1] — Dans cette expérience, comme dans celles qui suivent, il faut prendre des précautions minutieuses pour être certain de l'état neutre des aiguilles. M. Matteucci les faisait chauffer sur des charbons ardents, et les laissait refroidir dans l'air sec. Quand elles étaient fusibles, il se contentait d'en fondre légèrement la surface dans la flamme de l'alcool.

Si l'on électrise l'une des faces d'un corps isolant, on trouve la face opposée électrisée d'une manière contraire. Nous avons mentionné ce fait en exposant la théorie de l'électrophore (1280). Nollet avait déjà remarqué que lorsqu'on frotte extérieurement un ballon de verre dans lequel on a fait le vide, on aperçoit des lueurs assez vives dans l'intérieur. L'expérience des figures de Leichtenberg (1351) peut aussi servir à mettre en évidence le développement de l'électricité sur la face d'un corps opposée à celle que l'on électrise : on remplace le plateau de résine par une lame de verre mince vernie à la gomme laque sur ses deux faces, et l'on opère comme à l'ordinaire. On projette ensuite le mélange de soufre et de minium, sur la face opposée à celle sur laquelle on a promené le bouton de la bouteille, les poudres dessinent les lignes formées ; seulement, ces lignes présentent des couleurs opposées sur les deux faces.

Pour montrer directement la polarisation électrique, M. Matteucci chargea un condensateur dont la lame isolante était formée de feuilles minces de mica

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXVII, p. 133.

superposées ; ayant ensuite démonté ce condensateur, en se servant de tiges de verre, il trouva que les feuilles de mica présentaient sur leurs deux faces des états électriques différents, allant en diminuant d'intensité des lames externes à celles du milieu. Cependant, quand le condensateur reste longtemps et fortement chargé, il y a pénétration des électricités (1349), et chaque feuille de mica possède le même fluide sur les deux faces, mais en quantité d'autant plus petite que ces feuilles sont plus éloignées des armatures.

M. Buff ayant superposé quatre disques trés minces en résine, et frotté la base supérieure du plateau ainsi formé, vit la base inférieure prendre d'elle-même le fluide positif, et les disques présenter, aprés la séparation, des fluides contraires sur leurs deux faces. Le même observateur fait remarquer que l'électricité polaire peut apporter des erreurs graves dans l'emploi de l'*électromètre condensateur* (1322) : si l'on frotte par mégarde le plateau supérieur, en le posant sur une surface non polie, la couche de gomme laque qui le revêt peut s'électriser, et l'électricité produite, dissimulée par le fluide contraire qui prend naissance sur la face opposée de cette couche, peut ensuite intervenir dans les expériences électrométriques.

Citons encore l'expérience suivante de M. Faraday : on fait flotter dans de l'essence de térébenthine, de petits filaments de soie de 2 ou 3^{mm} de longueur. On plonge dans le liquide deux conducteurs, dont un est électrisé et l'autre communique avec le sol ; on voit alors les filaments se diriger d'un conducteur à l'autre, et se réunir, de manière à former des séries continues. Les filaments se tiennent assez fortement pour qu'on ait quelque peine à les séparer au moyen d'une tige isolante ; ils indiquent l'état électrique des molécules de l'essence qui les soutient. Des parcelles de sucre, de très petits fragments d'or battu, peuvent remplacer les filaments de soie. Avec l'or, on voit de petites étincelles qui passent d'un fragment à l'autre ; leur bonne conductibilité leur permettant de se décharger mutuellement, comme dans les tubes étincelants.

Les gaz peuvent vraisemblablement éprouver aussi la polarité électrique, comme semble le prouver la moindre résistance à la décharge, de l'air qui a déjà été traversé par l'étincelle (1346).

1354. Déplacement des fluides dans l'intérieur des corps. — Tandis quo dans les corps magnétiques les fluides séparés ne peuvent quitter les éléments magnétiques, dans les corps isolants, l'électricité polaire peut passer d'une molécule à l'autre, avec une rapidité qui dépend de l'intensité de l'action exercée, et du pouvoir plus ou moins isolant de la substance. Les corps *bons conducteurs* subissent aussi la polarisation moléculaire ; mais ils se distinguent des mauvais conducteurs par la facilité avec laquelle les électricités quittent les éléments électriques, en produisant entre eux des décompositions et recompositions successives, comme dans les tubes étincelants, pour se porter à la surface du corps ; de manière que l'état électrique moléculaire est détruit presque aussitôt que produit.

La théorie de la polarisation électrique, jointe à la faculté qu'ont les électri-

cités de quitter les molécules polarisées, va nous servir à expliquer les phénomènes suivants.

1° Si, comme l'a fait M. Matteucci, on électrise la balle métallique de l'aiguille d'une balance électrique, et qu'on en approche une sphère de gomme laque, soufre, ou verre à l'état naturel, on voit la balle de l'aiguille se précipiter vers le corps isolant, qui prend l'électricité polaire, y adhérer pendant quelque temps, puis être repoussée. Si la balle est à l'état neutre, et la boule isolante électrisée, l'attraction est plus vive, et il faut plus de temps pour que la répulsion se manifeste. Ces expériences montrent que l'électricité passe difficilement dans la substance isolante, et s'en sépare lentement.

2° Si l'on touche une lame de soufre, de gomme laque, ou d'acide stéarique, avec une boule isolante électrisée, on trouve sur la lame, au point de contact, du fluide contraire à celui de la boule, comme Æpinus l'avait déjà remarqué, et autour de ce point, une zone chargée de fluide de même nom. Ce n'est qu'avec de fortes charges et après un contact prolongé, que la lame touchée ne présente que l'espèce de fluide du corps électrisé. Si ce dernier est bon conducteur, la lame prend bientôt la même électricité que lui au point de contact, surtout si elle est mince et d'un petit diamètre. Si le contact ne durait que très peu de temps, et si la lame avait une grande masse, l'électricité pourrait être de nom contraire à celle de la boule.

1355. Intensité de l'électricité polaire dans les différentes substances. — La décomposition électrique moléculaire n'a pas lieu au même degré dans les différentes substances isolantes. M. Matteucci s'en est assuré par la méthode des oscillations, en faisant agir sur la balle électrisée d'une balance de Coulomb, des sphères égales de verre, de résine et de soufre à l'état neutre, placées à la même distance. Il opérait dans une cage de verre bien desséchée; les sphères, qui avaient 15^{cm} de diamètre, étaient placées sur une planche glissant dans une coulisse.

Voici les principaux résultats obtenus : un ballon en verre et une sphère de métal de même diamètre ont exercé sensiblement le même pouvoir attractif sur la balle oscillante, le ballon a donné les mêmes résultats quand il était vide ou rempli d'un liquide, conducteur ou non. Des sphères de résine et de soufre ont donné des attractions moindres. L'attraction d'une sphère de plomb étant représentée par 1, celle du globe de soufre a été 0,6, et celle du globe de résine, 0,47; la distance des centres du globe et de la balle étant de 10^{cm}. Quand on augmente cette distance, le pouvoir attractif du globe métallique diminue plus rapidement que celui des sphères isolantes; de sorte que les différences deviennent moindres. Il en est de même quand on diminue les diamètres des sphères; ainsi, la différence entre le soufre et le plomb est très petite, quand elles n'ont que 5^{cm} de diamètre. La nature de l'électricité de la balle oscillante n'a pas d'influence sur les résultats.

1356. Influence de la structure. — Quand on place entre deux conducteurs électrisés d'une manière opposée, une lame circulaire suspendue horizon-

talement par son centre, elle reste en équilibre dans une position quelconque, si elle est homogène; mais il n'en est plus de même quand cette lame est taillée dans un cristal n'appartenant pas au système régulier. On doit à M. Knoblauch de nombreuses expériences à ce sujet [1]. Les conducteurs électrisés étaient représentés par les pôles d'une *pile sèche* de 2000 couples, formés de papier argenté et de peroxyde de manganèse, appareil que nous décrirons plus tard. Voici les principaux résultats observés. 1° Des plaques de *nitre*, *spath d'Islande*, *carbonate de fer*, taillées parallèlement à l'axe du cristal, se placent de manière que cet axe soit perpendiculaire à la ligne des pôles; 2° l'axe se place suivant cette ligne, avec le *béryl* et la *tourmaline*; 3° une plaque de *sulfate de baryte*, ou de *gypse* taillée parallèlement au plan du clivage principal, se dirige de manière que la petite diagonale du losange déterminé par les clivages secondaires, soit perpendiculaire à la ligne des pôles. — Il faut éviter que le bord de la lame ne prenne par influence, de l'électricité permanente; il en résulterait une force directrice qui la ferait rester dans une position fixe. L'aragonite, le quartz et la topaze sont surtout sujets à cet inconvénient.

M. Knoblauch a obtenu des résultats analogues avec des corps fibreux, comme le bois, l'ivoire. Il a aussi taillé des lames dans des masses formées avec des poudres de diverses substances, verre, sulfate de baryte, oxydes métalliques, craie, bismuth, antimoine, etc., liées par de l'eau gommée, puis comprimées fortement. Ces lames circulaires étant taillées parallèlement à la direction de la compression se sont toujours placées de manière que cette direction fût perpendiculaire à la ligne des pôles.

1357. Polarisation dans l'induction. — Le développement de l'électricité polaire a évidemment lieu, pendant l'induction électrostatique (1266), dans la substance isolante qui sépare toujours le corps électrisé du conducteur sur lequel il agit à distance. Cette électricité polaire du milieu interposé doit ensuite réagir sur l'état électrique du conducteur, et d'une manière variable, suivant l'intensité de la polarisation, qui dépend de la nature de ce milieu. L'expérience suivante de M. Faraday met ce résultat en évidence :



Fig. 1016.

Deux disques métalliques B, C (*fig.* 1016), communiquant avec le sol, sont placés de part et d'autre et à la même distance d'un plateau A électrisé positivement. Les deux disques C et B se chargent par influence de fluide négatif, qui se trouve tout entier sur leur face intérieure. Si l'on supprime la communication de ces disques avec le sol, et qu'on place entre A et B une lame isolante rr', on trouve aussitôt du fluide positif sur la face extérieure de B, et du fluide

[1] *Ann. de Pogg.*, t. LXXXIII, 289; et *Ann. de ch. et de ph.*, 3e s., t. XXXIV, p. 117.

négatif en *c*. Ce résultat montre l'influence du milieu interposé ; car il n'y a de changé qu'une lame d'air, remplacée par une lame solide. Pour l'expliquer, remarquons que la lame *rr'* prend, sous l'influence de l'électricité de A, un état polaire dans lequel elle agit comme si elle était électrisée positivement sur la face *r*, et négativement sur la face *r'*. Le fluide positif qui agit en *r* augmente la décomposition du fluide neutre de B, en donnant naissance au fluide positif que l'on trouve en *b*. Le fluide négatif qui agit en *r'* attire vers lui le fluide positif du disque A, d'où il résulte une diminution d'action sur le disque C, et l'apparition d'une certaine quantité de fluide libre en *c*. Dés qu'on retire la lame *rr'*, les pendules *b* et *c* retombent.

M Matteucci a imaginé l'expérience suivante qui est très simple : on introduit une lame isolante entre les deux boules de la balance de torsion, pendant qu'elles sont électrisées d'une manière contraire, et maintenues à une certaine distance par la force de torsion : aussitôt on les voit se rapprocher, pour revenir à leur distance primitive dés qu'on enléve la lame.

Inductionomètre différentiel. — Par ce dernier moyen, on ne distingue pas de différence entre les effets produits par les diverses substances isolantes. Mais par la méthode de Faraday, on trouve que l'effet est plus marqué avec une lame de soufre qu'avec une lame de gomme laque ; ce qui peut se reconnaître facilement en interposant des lames égales de ces substances, l'une entre A et B, l'autre entre A et C ; le résultat est, avec une moindre intensité, celui que produirait la lame de soufre seule. Dans ce cas, pour rendre les résultats plus faciles à apprécier, au lieu de suspendre simplement des pendules aux plateaux B et C, on les fait communiquer respectivement avec les feuilles d'or *b* et *c* (*fig.* 1017) écartées et isolées l'une de l'autre, d'un électroscope particulier V ; on voit ces feuilles d'or s'incliner l'une vers l'autre sous l'influence de la plus petite quantité d'électricité. M. Faraday destinait l'appareil ainsi modifié à comparer les effets produits par les différentes substances isolantes, c'est pourquoi il l'a nommé *inductionomètre différentiel.*

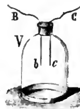


Fig. 1017.

1358. Des corps diélectriques et du pouvoir inductif. — Pendant longtemps, on a regardé les substances isolantes qui séparent les conducteurs, comme purement passives, dans le phénomène de l'induction. Nous voyons que ces substances jouent un certain rôle, par l'électricité polaire qu'elles prennent sous les influences réunies du corps électrisé *inducteur* et du corps électrisé par induction. Pour rappeler ce rôle actif qu'il attribue à ces corps isolants, M. Faraday les nomme corps *diélectriques*. Comme l'intensité de l'effet que produisent ces corps n'est pas la même pour tous, il a été conduit à comparer les *capacités inductives* ou *pouvoirs inductifs* des diverses substances isolantes ; nous venons de voir que l'*inductionomètre différentiel* peut servir à cet usage.

M. Faraday a encore comparé les pouvoirs inductifs, au moyen de l'appareil

(*fig.* 1018). Il consiste en une bouteille de Leyde particulière, dont l'armature extérieure est formée d'une sphère métallique creuse, qui peut se séparer en deux, suivant un grand cercle horizontal *ab*. L'armature intérieure est un globe *c* soutenu par une tige métalllique, terminée par un bouton B, et isolée de la sphère extérieure par une colonne de gomme laque qu'elle traverse. Entre le globe intérieur et l'enveloppe *ab*, se trouve un espace que l'on peut remplir de divers gaz, par le robinet que porte le pied de l'appareil. On peut aussi le remplir avec des substances solides, travaillées en forme de calottes hémisphériques s'appliquant exactement sur les deux armatures, et que l'on introduit en séparant les deux hémisphères en *ab*.

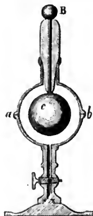


Fig. 1018.

Pour comparer les pouvoirs inductifs de l'air et d'un diélectrique quelconque, par exemple la gomme laque, on emploie deux appareils identiques, l'un contenant de l'air, et l'autre la gomme laque. On charge le premier, à la manière d'une bouteille de Leyde, et, au moyen de la balance de torsion et du plan d'épreuve appliqué en B, on détermine la tension T de l'électricité libre de l'armature intérieure. On fait ensuite communiquer les boutons des deux appareils, de manière que la charge du premier passe en partie dans l'autre, puis on supprime la communication. On trouve alors que la tension T′ de l'électricité libre, dans l'appareil à air, est beaucoup plus petite que $\frac{1}{2}$T ; ce qui montre que l'appareil à gomme laque a enlevé plus de la moitié de l'électricité de l'autre appareil, tandis que ces appareils se seraient partagé également l'électricité s'ils eussent été l'un et l'autre remplis d'air. Il faut donc qu'il y ait eu une plus grande quantité d'électricité dissimulée dans l'appareil à gomme laque.

Pour déduire de l'expérience, le pouvoir inductif de la gommela que, celui de l'air étant pris pour unité, il faut remarquer que la tension du fluide *libre* sur l'appareil à gomme laque, est T′ comme sur l'appareil à air, puisqu'il y a eu communication. Or, la quantité d'électricité libre perdue par ce dernier est T—T′ ; et si la condensation se fût faite dans le premier comme s'il eût été rempli d'air, la quantité d'électricité qu'il eût accumulée eût donné lieu à une tension d'électricité libre égale à T—T′ ; mais cette tension n'est que T′, moindre que $\frac{1}{2}$T ; les forces condensantes de l'air et de la gomme laque sont donc entre elles comme T—T′ : T′ ; puisque, pour une même quantité totale d'électricité V, la force condensante V : v est en raison inverse de la quantité v d'électricité libre (1232). On déterminera donc le pouvoir inductif x de la gomme laque par rapport à l'air, au moyen de la proportion $1 : x = T' : (T-T')$. Comme vérification, M. Faraday a fait l'expérience inverse, en chargeant d'abord l'appareil à gomme laque, puis le mettant en communication avec celui

qui contenait de l'air : il a trouvé la tension du bouton du premier plus grande que la moitié de sa tension primitive.

M. Harris, M. Masson et M. Belli ont aussi fait des expériences sur les pouvoirs inductifs. M. Harris employait des condensateurs plans, dont il changeait la lame isolante, en suivant la marche que nous venons de décrire. Voici quelques résultats trouvés par M. Faraday, (F), et par M. Harris, (H) :

spermaceti (F).	*verre* (F).	*résine* (H).	*poix* (H).	*cire d'abeille* (H).	*gomme laque* (F).	*soufre* (F).
1,45	1,76	1,77	1,80	1,86	2,00	2,24

Les différents gaz, comprimés ou raréfiés, à 0° ou à 200°, ont présenté le même pouvoir inductif.

1359. De la théorie électrique de M. Faraday. — Nous voyons que le milieu isolant interposé entre deux conducteurs, joue un rôle actif dans l'induction. M. Faraday va plus loin et considére ce milieu comme nécessaire à l'induction, et ce ne serait que par suite d'une décomposition moléculaire d'électricité neutre se propageant de proche en proche avec une rapidité extrême et comme cela a lieu dans les tubes étincelants, que l'induction se produirait à distance. En partant de là, M. Faraday a été conduit à formuler une nouvelle théorie des phénomènes électriques, dans laquelle il repousse les actions à distance (si ce n'est à la distance des molécules), et les ramène toutes à des effets d'induction se manifestant par la polarisation électrique. Cet éminent physicien admet que l'état électrique absolu d'un corps ne peut exister sans qu'il y ait à l'extérieur des corps conducteurs ou isolants dans un état électrique opposé ; de même qu'un ressort ne peut être tendu et prêt à agir qu'autant qu'il existe une réaction égale à l'action dont il est capable, et exercée en sens contraire sur quelque obstacle. Dans cette théorie, l'accumulation de l'électricité à la surface des conducteurs ne serait qu'apparente ; dans l'intérieur, on ne trouverait pas d'électricité, parce que toutes les particules se neutraliseraient mutuellement, tandis que les molécules de la surface, recevant l'induction des corps extérieurs, leur électricité deviendrait sensible. Si cette électricité est plus marquée aux points saillants des surfaces, c'est que ces points sont exposés aux actions inductrices des corps environnants, dans un plus grand nombre de directions. Quand cette induction est très forte, comme aux pointes, il y a dans le milieu ambiant des décharges moléculaires qui forment les aigrettes lumineuses. Les corps électrisés de la même manière s'écartent, non par la répulsion des fluides qu'ils contiennent, mais par l'attraction des molécules polarisées du milieu ambiant ou des corps placés en dehors de part et d'autre, lesquelles sont constituées, par induction, dans un état électrique opposé.

Nous ne donnerons pas de plus longs détails sur cette théorie très ingénieuse et très profonde ; mais nous ferons remarquer que le point de départ est l'induction et son explication par la polarisation des diélectriques. Or, cette

explication est contredite par certaines expériences de M. Matteucci[1], faites avec la balance électrique décrite plus haut (*fig.* 1015). Quand les boules électrisées se sont écartées d'une certaine quantité, on introduit une lame isolante dont une des faces est garnie d'une feuille d'étain communiquant avec le sol, et dont l'autre face s'applique sur la boule fixe; cette boule forme ainsi la seconde armature d'un petit condensateur. On voit aussitôt la balle mobile se rapprocher; et, en détordant le fil de manière à reproduire le même écart, on peut évaluer la force répulsive qui reste. Quand on ôte ensuite la lame isolante, après 5 minutes de contact, on évalue de même la quantité d'électricité emportée par cette lame, en reproduisant encore l'écart primitif. On peut comparer ainsi les degrés d'induction de différentes lames interposées entre deux armatures. On trouve d'abord que les répulsions électriques pendant le contact, et après qu'on a enlevé la lame, sont beaucoup plus petites quand la lame est armée d'une feuille d'étain que lorsqu'elle est nue (1350); ce qui montre encore que la perte est due à la pénétration des fluides, et que les différences observées dans la comparaison des pouvoirs inductifs pourraient bien provenir, presque en totalité, d'une cause analogue. Pour vérifier cette conjecture, M. Matteucci construisit une petite caisse, en réunissant avec de la gomme laque, des feuilles de mica laissant entre elles un espace de 10^{mm}. Il recouvrit les deux faces de cette caisse, d'une couche de gomme laque de $2^{mm},5$ d'épaisseur, et opéra comme nous venons de le dire, avec cette caisse pour lame isolante. Il répéta ensuite l'expérience, après avoir coulé du soufre dans l'intérieur, qui d'abord ne contenait que de l'air; et il trouva les mêmes résultats. Deux lames différentes produisent donc les mêmes effets quand les couches superficielles qui les terminent sont les mêmes ; les parties intérieures n'ont donc pas d'influence, ce qui est en contradiction avec la supposition que l'induction est produite par la polarité du diélectrique interposé. Des expériences faites avec une lame de soufre, ou avec des lames de verre ou de gomme laque recouvertes d'une couche de soufre suffisamment épaisse, ont conduit à la même conclusion.

Remarquons encore que l'induction a lieu à travers un récipient vide, quelles que soient ses dimensions, avec la même intensité que lorsqu'il est rempli d'air, ou de tout autre gaz à une pression et une température quelconque. La nature des molécules interposées, et leur état de condensation, devraient pourtant avoir une influence sensible sur l'induction, si elle était la conséquence d'une polarité préalable du milieu interposé. L'explication de la répulsion ne peut convenir au cas des corps dans le vide, où elle s'exerce sensiblement avec la même intensité que dans l'air (1223). D'un autre côté, les actions à distance (qu'il faut bien admettre aussi dans la théorie de M. Faraday pour la distance des molécules) n'ont rien qui répugne à l'esprit, puisque nous les voyons s'exercer à des distances immenses entre les corps célestes, et aussi entre les aimants séparés par des substances non magnétiques.

Nous pensons donc pouvoir conclure de ce qui précède, que la théorie dans

laquelle on regarde l'électricité comme un fluide agissant à distance est toujours celle qui explique le mieux, jusqu'à présent, l'ensemble des phénomènes électriques. Le fait de la polarisation des corps isolants ne lui est pas contraire, et vient même la compléter, en montrant comment les deux électricités prennent naissance dans les molécules, pour les quitter et venir à la surface, quand les corps sont bons conducteurs.

La propagation de l'électricité par des décharges successives entre les particules, constitue un phénomène à part, établi et généralisé par M. Faraday, mais qui est relatif à la manière dont le fluide se déplace dans les corps. Ici la polarisation moléculaire explique bien ce qui se passe dans les aigrettes lumineuses et même dans l'étincelle proprement dite; elle n'est nullement en contradiction avec la théorie de Symmer; elle ne fait qu'interpréter un phénomène particulier, au moyen des principes mêmes de cette théorie.

6. — DES MÉTÉORES ÉLECTRIQUES.

I. Du tonnerre.

1360. Depuis qu'on connaît les principales propriétés de l'électricité, on est parvenu à expliquer divers phénomènes atmosphériques, dont la cause était restée obscure jusque-là. Un des plus remarquables est le phénomène du *tonnerre*, qui accompagne les orages. Un orage consiste en une pluie à grosses gouttes, tombant de nuages épais au milieu desquels s'élancent de longs sillons de lumière, ou *éclairs*, suivis d'un bruit intense nommé *roulement du tonnerre*. Quand l'éclair aboutit à un point de la surface de la terre, on dit que ce point est frappé par la *foudre*. La foudre n'est donc autre chose que l'éclair arrivant jusqu'à terre [1]. On dit alors vulgairement que le tonnerre tombe.

De la cause du tonnerre. — D'après les plus anciens philosophes, le tonnerre était un attribut de la divinité; quelques-uns le regardaient comme un esprit, et n'en cherchaient pas davantage. Suivant d'autres, le tonnerre était le résultat de la rencontre de certaines *influences* que se renvoyaient mutuellement les astres; ou bien le produit d'émanations s'élevant de la terre, idée ridiculisée par Aristophane dans sa comédie des *Nuées*. Sénèque explique le tonnerre par le choc des nuages les uns contre les autres; opinion développée par Lucrèce, dans le dernier chant de son poëme *de rerum naturâ*. Les physiciens ont d'abord attribué ce météore à l'inflammation de certaines exhalaisons venues de la terre; les chimistes, à la réaction d'un mélange de nitre, soufre, fer, esprits acides, huiles essentielles, qu'ils supposaient exister

1 Sénèque faisait déjà cette distinction : « Fulguratio est fulmen, non in terras usque perlatum. Et rursus licet dicas, fulmen esse fulgurationem, usque in terras perductam (*Natural. quæst.*, lib. II, cap. XXI). »

dans les régions supérieures de l'atmosphère. L'identité de composition de l'air à toutes les hauteurs, démontre l'inanité de ces systèmes.

Ce n'est qu'après la découverte de l'étincelle électrique, que l'on commença à soupçonner la véritable cause du tonnerre. Wall, qui, le premier, obtint d'un gros morceau d'ambre des étincelles assez fortes, compara leur éclat à celui de l'éclair, et le bruit qui les accompagne, à celui du tonnerre, sans qu'il paraisse cependant qu'il y ait eu d'autre intention que de faire un rapprochement curieux. Gray, en 1735, paraît avoir le premier soupçonné une analogie entre l'étincelle et l'éclair. La même idée est formulée d'une manière plus nette par Nollet : après avoir combattu l'hypothèse, adoptée par Newton, que le tonnerre est dû à un « mélange d'exhalaisons capables de s'enflammer, en fermentant, ou par le choc et la pression des nuées..., » il fait connaître les motifs spécieux qui lui font supposer que le tonnerre a pour cause l'électricité, et que les effets merveilleux qu'elle engendre entre nos mains ne sont « que de petites imitations de ces grands effets qui nous effrayent, et que tout dépend du même mécanisme [1]. »

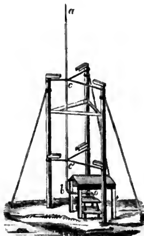


Fig 1019.

On n'avait encore fait que des conjectures et quelques rapprochements plus ou moins heureux, lorsque Franklin, en étudiant la bouteille de Leyde, parvint à fondre des fils métalliques par sa décharge, et à volatiliser la dorure d'un objet en bois, sans brûler ce dernier. Il compara ce résultat à certains effets de la foudre, qui fond l'argent dans une bourse sans l'endommager, la pointe d'une épée dans son fourreau qui reste intact, et le fer d'un javelot sans brûler le bois. Dès lors, Franklin eut des idées bien arrêtées sur l'origine électrique du tonnerre; il ne lui manquait qu'une preuve directe de la présence de l'électricité dans les nuages orageux, et cette preuve, il travailla avec ardeur à l'acquérir. Il venait de découvrir le pouvoir des pointes, et pensa d'abord à s'en servir pour *soutirer*, suivant l'expression erronée d'alors, le fluide des nuages. Il songea même, dès ce moment, à l'application au paratonnerre. Il se proposait de planter une pointe de fer isolée, au sommet d'un clocher que l'on construisait à Philadelphie, et, en attendant, il publia ses idées, et indiqua les moyens de les mettre à exécution. C'est d'Alibart qui, le premier, répondit à cet appel. Il dressa dans une plaine élevée, à Marly-La-Ville, une barre de fer de 14 mètres de hauteur, *abo* (*fig.* 1019), terminée en pointe, appuyée en *o*

[1] *Leçons de physique expérimentale* (1771), t. IV, p. 314.

sur un tabouret isolant, et soutenue en c, c', par des cordons de soie attachés à trois mâts. Le 10 mai 1752, il put tirer des étincelles du pied de la barre, pendant le passage d'un nuage orageux. Cette expérience, célèbre sous le nom d'expérience de Marly-La-Ville, fut répétée par Delor, Mazéas et Lemonnier, en France; Canton, en Angleterre; Beccaria, en Italie; Richmann, en Russie... D'Alibart et Canton adaptèrent à la barre un carillon électrique, qui avertissait de la présence de l'électricité, et qui, de plus, constituait un appareil préservateur par lequel l'électricité pouvait facilement s'écouler dans le sol, à cause de la faible distance des timbres. Ce rôle du carillon est loin d'être inutile : des observateurs furent renversés violemment par des étincelles parties de barres isolées, et Richmann, à Pétersbourg, paya de sa vie l'oubli de semblables précautions [1].

1361. Cerf-volant électrique. — Cependant Franklin, las d'attendre l'achèvement de son clocher, conçut l'idée de lancer vers les nuages, un cerf-volant en soie armé d'une pointe. Il procéda à cette expérience accompagné de son fils seul, craignant, comme il le dit lui-même naïvement, le ridicule qui s'attache souvent aux expériences originales, quand elles ne sont pas couronnées de succès. La corde était retenue à son extrémité inférieure par un cordon de soie. D'abord il n'obtint aucun résultat; mais la pluie ayant mouillé la corde, il vit des filaments se dresser, et ayant aussitôt approché le doigt, d'une clef suspendue à la corde, il vit, avec une vive émotion, jaillir une première étincelle, et put ensuite en obtenir un grand nombre.

L'expérience de Franklin est de 1752 Un an après, Romas, ignorant les essais du célèbre Américain, faisait en France des expériences semblables, pour répondre à une question proposée en 1749 par l'Académie de Bordeaux, sur les analogies entre la foudre et l'électricité [2]. Il eut l'idée heureuse de rendre la corde du cerf-volant conductrice, en l'entrelaçant avec un fil métallique; aussi obtint-il des résultats d'une intensité remarquable. La corde était retenue par un cordon de soie fixé sous un auvent qui le préservait de la pluie, et elle portait à son extrémité un cylindre en fer-blanc. La première expérience de Romas fut faite en juin 1753. Il vit d'abord des brins de paille s'élancer vers le cylindre, au grand plaisir des spectateurs; il tira ensuite des étincelles au moyen d'un excitateur, imaginé à cette occasion, et qui consistait en un conducteur métallique communiquant par une chaîne, avec le sol, et tenu par un manche de verre. Plus tard, il put obtenir, pendant un orage assez faible, des centaines d'étincelles, dont quelques-unes ayant jusqu'à 4^m de longueur et 3^{cm} d'épaisseur, produisaient plus de bruit qu'un coup de pistolet.

[1] Richmann avait planté sur un toit une barre de fer, isolée par une bouteille percée qu'elle traversait, et communiquant, par une chaîne, avec une tige, aussi isolée, fixée au plafond de son cabinet. Cette tige était terminée par une boule, dont il tirait des étincelles en en approchant un conducteur communiquant avec le sol. S'étant trop approché de la boule, il fut frappé à la tempe par une étincelle, à une distance de $0^m,3$, et tomba raide mort.

[2] *Mémoires des savants étrangers*, t. II, et IV.

Chariot électrique. — Ces expériences furent répétées par Charles, Beccaria, Cavallo... Le premier se servait du *chariot électrique*, imaginé par Romas. Ce chariot porte un treuil soutenu par des colonnes de verre, et autour duquel s'enroule la corde du cerf-volant. On fait tourner le treuil au moyen d'une manivelle en verre, et pendant tout le temps qu'on file la corde, on la fait communiquer avec le sol par une chaîne, qui s'attache, d'une part à l'axe du treuil, et d'autre part à un piquet en fer enfoncé en terre. Quand on veut expérimenter, on enlève la chaîne avec des tiges de verre, et la corde se trouve isolée. Il faut procéder avec une extrême prudence; Charles avait coutume d'entourer son appareil d'un cercle de pieux en fer, en dehors duquel il avait soin de se tenir.

Il résulte des ces expériences que les nuages orageux contiennent des quantités prodigieuses d'électricité. Cette électricité est tantôt positive et tantôt négative; par exemple, Canton a vu l'électricité que lui donnait une barre isolée terminée en pointe, changer de nature plusieurs fois pendant une heure. Nous ne rechercherons pas, pour le moment, d'où vient cette électricité; nous remarquerons seulement, avec Franklin, de Saussure, Beccaria..., que, le plus souvent, il y a au moins deux couches de nuages, entre lesquelles jaillissent les éclairs. Ces nuages sont animés de mouvements produits par le vent, ou par les attractions ou répulsions électriques qu'ils exercent les uns sur les autres. Il s'agit maintenant d'expliquer l'éclair et le roulement du tonnerre.

1362. DE L'ÉCLAIR. — L'éclair n'est autre chose qu'une immense étincelle électrique partant entre deux nuages. Il affecte, en effet, la forme sinueuse ou en zig-zag de l'étincelle; il en a l'instantanéité, et présente les mêmes couleurs; ainsi, il peut être blanc, d'une teinte violacée, verdâtre.

Supposons deux nuages en présence l'un de l'autre, l'un électrisé positivement et l'autre négativement. Ces deux nuages vont s'attirer, et quand la distance sera assez petite, la décharge aura lieu. Il n'y a, ici, de difficile à concevoir que l'énorme longueur du trait lumineux; car dans les pays de montagnes, où l'on peut, en dominant l'orage, mieux juger des dimensions des éclairs, on a reconnu qu'ils pouvaient présenter plus de 10 kilomètres de longueur. Il semble qu'une telle longueur suppose une tension prodigieuse dans l'électricité des nuages; mais il existe plusieurs circonstances qui facilitent la décharge et lui permettent de se produire à une très grande distance: 1° l'air des hautes régions de l'atmosphère est très raréfié, ce qui permet à l'étincelle de partir à une grande distance (1284); 2° cet air étant très humide, est sensiblement conducteur; il n'oppose donc qu'un faible obstacle à la réunion des fluides; 3° enfin, il peut exister entre les nuages, des lambeaux de nuages ou des gouttelettes disséminées formant comme un léger brouillard, dont les particules jouent le rôle des grains de limaille des tableaux magiques, sur lesquels on obtient des sillons lumineux d'une longueur considérable (1286).

Les mêmes nuages donnent successivement un grand nombre de décharges. Cela tient d'abord à leur imparfaite conductibilité, qui fait que chaque éclair

ne les décharge que partiellement ; en second lieu, ces nuages croissent et se renouvellent pendant quelque temps, et les parties qui se forment, apportent avec elles de nouvelles quantités d'électricité. Quand les nuages cessent de se régénérer, les éclairs deviennent de plus en plus rares et de plus en plus faibles, et l'orage s'éteint peu à peu. Une partie de l'électricité des nuages est aussi enlevée par la pluie abondante qui accompagne les orages, et qui éprouve souvent une recrudescence marquée après chaque coup de tonnerre ; la nuit, les gouttes de pluie peuvent paraître lumineuses en arrivant à terre.

Durée de l'éclair. — Les éclairs isolés n'ont qu'une durée inappréciable. M. Weatstone a prouvé que cette durée n'est pas d'un *millionième de seconde*. Pour cela, il recevait la lumière d'éclairs nocturnes, sur un disque portant des rayons très serrés, et auquel il imprimait une très grande vitesse de rotation. Quelle que fût cette vitesse et le nombre des rayons, le disque paraissait toujours fixe pendant qu'il était illuminé par l'éclair ; il n'avait donc pas le temps de se déplacer pendant la durée de ce dernier. Désignons par n le nombre de tours que fait le disque par seconde, et par r, le nombre de ses rayons, la durée de l'éclair est moindre que le temps que met un rayon pour venir prendre la place de celui qui le précède. Or, ce temps est égal à une fraction de la durée d'un tour, égale à $1 : r$, ou à la fraction de seconde $1 : nr$. Si le disque était éclairé au moyen d'une lampe dont on découvrirait un instant la lumière, en levant et abaissant aussi rapidement que possible un écran, ce disque paraîtrait toujours d'une teinte uniforme, et l'on n'y distinguerait aucun rayon.

Souvent les éclairs sont discontinus, comme s'ils étaient produits par plusieurs décharges se succédant très rapidement, et provoquées les unes par les autres, à des intervalles de temps sensibles à cause de l'imparfaite conductibilité des nuages. Cela se voit directement ; mais on peut le reconnaître aussi, comme l'a fait M. Dove, au moyen du disque tournant : les rayons semblent osciller, parce qu'ils apparaissent successivement dans différentes positions, pendant les illuminations instantanées et très rapprochées.

Éclairs de seconde classe. — Indépendamment des éclairs dont nous venons de parler, qu'il nomme *éclairs de première classe*, Arago distingue des *éclairs de seconde classe*, qui consistent en lueurs instantanées qui illuminent les nuages, tantôt sur leur contour seulement, tantôt par toute leur surface. La couleur de ces lueurs est rouge intense, quelquefois bleuâtre ou violette ; il ne paraît pas qu'elle soit accompagnée de bruit perceptible. On peut regarder ces sortes d'éclairs comme des décharges ou des mouvements brusques de fluide, qui se font dans l'intérieur d'un même nuage imparfaitement conducteur, en produisant des lueurs analogues à celles que l'on observe sur une lame de verre humide avec laquelle on cherche à décharger une machine électrique. Du reste, quelques-unes de ces lueurs peuvent être dues à des éclairs de première classe séparés de l'observateur par un rideau de nuages, qu'ils illuminent subitement.

1363. Des éclairs sans tonnerre. — A la suite des journées chaudes,

on aperçoit souvent à l'horizon des lueurs connues sous le nom d'*éclairs de chaleur*; elles sont dues à des orages lointains dont le bruit ne parvient pas jusqu'à l'observateur, tandis que les éclairs, réflétés par l'atmosphère, se distinguent à une distance beaucoup plus grande [1]. Cette explication, donnée par Sénèque, a été souvent vérifiée; on a constaté que des orages avaient éclaté du côté où l'on avait aperçu des éclairs *de chaleur*, et à la même heure. M. Kaemtz a fait bien des fois cette observation. Souvent aussi, l'apparition de ces lueurs a été suivie d'orages venus, pendant la nuit, des points de l'horizon où on les avait aperçues.

Indépendamment de ces éclairs à l'horizon, on a observé des éclairs silencieux, dans des conditions toutes différentes. Le Père de Lozeran de Fesc parle d'éclairs *très vifs* et non accompagnés de bruit. Deluc le jeune cite un orage dans lequel il vit au *zénith* des éclairs nombreux, après lesquels il n'entendait rien. Or, il y a des nuages orageux qui sont à plus de 8 kilomètres de hauteur; si ces éclairs jaillissaient à de semblables hauteurs (ce qu'on ne dit pas), on concevrait que le son, éprouvant de nombreuses réflexions en traversant des couches d'air de densité croissante (I, 530), ait pu s'affaiblir au point d'être à peine perceptible; c'est ainsi que le bruit du tonnerre ne s'entend pas ordinairement à plus de 5 à 6 lieues, tandis que le bruit du canon se distingue encore à plus de 30 lieues. De plus, les vents violents qui règnent autour des nuages orageux, empêchent la propagation régulière des ondes sonores, et peuvent, dans certains cas, réduire notablement la distance à laquelle elles se propagent. Du reste, parmi les éclairs observés par Deluc, il y en avait qui étaient accompagnés d'un très faible bruit; un seul produisit une violente explosion, ce qui peut tenir à ce qu'il s'était produit à une bien moindre distance que les autres.

On voit que les faits précédents ne prouvent aucunement l'existence d'éclairs sans tonnerre. Le fait suivant semble, au premier abord, trancher la question: M. Griswold se trouvant dans l'Illinois, à 400 mètres environ d'une *trombe*, vit des éclairs éblouissants allant des nuages à la terre, tout près ou le long de la surface extérieure de la trombe, et il n'entendit aucun bruit. Il admet néanmoins que le bruit existait, mais que le tourbillon d'air enveloppant la trombe détruisait les ondes sonores. Cette explication ingénieuse nous paraît satisfaisante, et il ne manque pas de raisons spécieuses pour l'appuyer.

S'il n'y a pas de motifs pour admettre qu'il existe des éclairs non accompagnés d'un ébranlement de l'air, nous n'en voyons pas, non plus, d'admettre

[1] Plusieurs observations directes prouvent que le bruit du tonnerre ne parvient guère qu'à 5 ou 6 lieues, tandis que la lueur des éclairs se distingue à plus de 25 lieues. Pour donner une idée de l'énorme distance à laquelle peut ainsi parvenir la lumière réfléchie par l'atmosphère, nous dirons que des observateurs ont pu voir, à 60 lieues de distance, la lueur de quelques grammes de poudre que l'on brûlait à l'air libre pour faire des signaux, tandis que la rondeur de la terre empêchait de voir la flamme elle-même.

le tonnerre sans éclairs. Arago cite bien quelques observations où l'on a entendu le bruit du tonnerre sans voir d'éclairs; mais comme il n'est pas dit que le phénoméne ait été observé pendant la nuit, ni si le bruit était fort ou faible, ces observations ne nous semblent pas concluantes; car il suffirait que l'orage eût été éloigné, et les éclairs séparés de l'observateur par un rideau de nuages, pour que l'éclair n'eût pas été aperçu en plein jour.

1364. ROULEMENT DU TONNERRE. — La décharge de nos appareils est accompagnée d'une explosion instantanée, tandis que le bruit du tonnerre se prolonge avec des diminutions et des augmentations d'intensité alternatives suivies d'un grondement sourd qui va en s'affaiblissant graduellement. On a d'abord attribué ce résultat à des échos renvoyés par les montagnes ou par les nuages; mais alors le bruit devrait toujours aller en diminuant d'intensité, puisque les sons réfléchis qui arrivent les derniers ont parcouru le plus d'espace. Il faut donc chercher une autre cause, tout en reconnaissant que des réflexions sur les nuages peuvent contribuer à l'effet général; car les membres du Bureau des longitudes, dans leurs expériences sur la vitesse du son (I, 435), ont remarqué que le bruit du canon se répétait plusieurs fois quand il passait quelques nuages. C'est par exemple à de semblables échos qu'on peut attribuer le grondement sourd qui termine les coups de tonnerre.

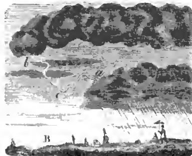


Fig. 1020.

R. Hooke a donné l'explication suivante, en s'appuyant sur la grande longueur de l'éclair et sur la transmission progressive du son : l'éclair n'a pas de durée appréciable, l'ébranlement qu'il produit dans l'air existe donc au même instant dans tous les points de son parcours. Or, un ébranlement se propage avec une vitesse de 337^{m} par seconde. Les ébranlements produits en *a*, *c*, *b* (*fig.* 1020), arriveront donc à l'oreille d'un observateur placé en A, les uns aprés les autres. Par exemple, si la différence entre les distances *b*A et *a*A est de 337^{m}, le son engendré en *b* arrivera en A, une seconde aprés celui qui a pris naissance en *a*. Comme, entre ces deux distances, il y en a une infinité d'autres passant des unes aux autres d'une manière continue, on voit que le bruit sera lui-même continu.

Les changements d'intensité proviennent de deux causes : 1° l'éclair, dans ses vastes sinuosités, passe à travers des couches d'air de densité très différente, soit à cause des inégalités dans la pression, provenant des diverses hauteurs, soit à cause des quantités variables d'humidité; or, l'intensité du son à son origine, dépend de la densité du milieu ébranlé (I, 525). 2° Différents points de l'éclair pouvant être à la même distance de l'observateur, les ébranlements

produits en ces points arriveront en même temps à l'oreille, et produiront un renforcement subit.

Il y a des coups de tonnerre *déchirants*, que Lucrèce compare au cri du papier ou du parchemin que l'on déchire, et qui ne sont que des bruits violents séparés par des interruptions très courtes. On peut les expliquer, soit par plusieurs décharges presque simultanées, soit par des décharges ayant lieu en même temps entre plusieurs nuages qui sont sous l'influence les uns des autres, comme les losanges des tubes étincelants, de manière à former un éclair interrompu, accompagné par conséquent d'un bruit discontinu.

Evaluation de la distance et de la longueur de l'éclair. — Le son parcourant 337^m par seconde, le nombre de secondes écoulées entre le moment où l'on voit l'éclair et le commencement du bruit du tonnerre étant multiplié par 337, donnera la distance du point le plus rapproché de l'éclair. Quand on n'a pas besoin d'une grande précision, on peut mesurer le temps par les battements du pouls, qui marquent à peu près des secondes.

La durée du roulement qui suit l'éclair peut donner une idée de sa longueur; car cette durée, multipliée par 337, fait connaître la différence entre les distances de ses deux extrémités à l'oreille de l'observateur. Cette différence est plus petite que la ligne droite qui joindrait les deux extrémités de l'éclair; car, dans le triangle qui aurait pour sommets les points *a*, *b*, A (*fig.* 1020), le côté *ab* est plus grand que la différence des deux autres *a*A, *b*A. Or, Delisle a observé, à Paris, des roulements de tonnerre ayant duré 39^s, 41^s et 45^s, ce qui correspond à 3,3; 3,4; 3,8 lieues! mais il faut remarquer que le grondement sourd qui termine le roulement aurait dû en être séparé, parce qu'il doit être attribué à des échos sur les nuages.

1365. DE LA FOUDRE. — Quand un nuage fortement électrisé est assez rapproché de la terre, il décompose par influence l'électricité neutre du sol, principalement dans les objets élevés, attire vers la surface le fluide de nom contraire, et refoule dans les profondeurs de la terre, le fluide de même nom. Le nuage est alors soumis à une attraction, qui accumule son électricité dans ses parties inférieures, et tend à le faire descendre; et, les gouttes de pluie facilitant la décharge, les deux fluides en présence, se joignent à travers l'air; et le point du sol où aboutit l'étincelle est *foudroyé*. Dans ce cas, on entend un coup simple, parce que l'éclair étant à peu près vertical, et de peu de longueur, ses différents points sont à des distances sensiblement égales de l'observateur. Quelquefois cependant le coup est déchirant; nous allons voir pourquoi.

Foudres bifurquées, etc. — On a vu l'éclair se *bifurquer*, et même, mais bien plus rarement, se *trifurquer* en approchant du sol; phénomène analogue à celui qui s'observe dans l'étincelle des machines. Il paraît que la subdivision peut aller au-delà de ce que l'observation a constaté; car, en examinant les effets produits par un seul coup de foudre, on a reconnu plusieurs fois que l'éclair avait dû aboutir en même temps à cinq ou six points assez éloignés les

uns des autres. C'est quand la foudre se subdivise ainsi, que le bruit est déchirant, parce qu'il y a plusieurs lignes d'ébranlement inégalement distantes de l'observateur.

1366. Des objets exposés à la foudre. — Les objets les plus élevés sont naturellement les plus exposés à être foudroyés : les arbres isolés, les clochers, les navires en mer, les sommets des montagnes, sont fréquemment frappés de la foudre. Cependant la nature des corps a une grande influence, qui peut l'emporter même sur celle de la hauteur. Ainsi, les corps bons conducteurs, dans lesquels le fluide contraire à celui du nuage peut s'accumuler en grande quantité, sont atteints de préférence à d'autres plus élevés ; on a vu, par exemple, la foudre frapper des buissons aux pieds de hautes tours construites en matériaux secs mauvais conducteurs, dans lesquels la décomposition du fluide neutre n'avait pu se faire qu'à un faible degré. Le tonnerre frappe souvent les cheminées, tant à cause de leur position élevée, que de la conductibilité de la suie qui en garnit l'intérieur, et que le fluide ne manque pas de suivre. Les arbres sont dans le même cas ; ils sont bons conducteurs, excepté les arbres résineux, que la foudre n'atteint que rarement. On ne saurait donc trop recommander de ne jamais se réfugier sous les arbres isolés, en temps d'orage. Il faut éviter aussi le voisinage des meules de blé ou de fourrage, qui forment un point culminant au milieu des champs, et dont les couches superficielles deviennent conductrices, par la pluie qui ruisselle à leur surface.

Si quelque partie du sol est douée d'un pouvoir conducteur prononcé, soit à cause de sa nature, soit à cause de la présence de couches aquifères, la foudre pourra les frapper de préférence à des édifices ou à des points élevés situés dans le voisinage. La foudre frappe souvent la surface des eaux. On voit parfois le liquide se soulever en obéissant à l'attraction de l'électricité du nuage, le monticule ainsi formé se déplacer en même temps que ce dernier, et la foudre éclater en faisant bouillonner l'eau, et quelquefois en tuant un grand nombre de poissons.

1367. Du trajet de la foudre dans les édifices. — Quand la foudre frappe un édifice, la route que suit le fluide est très irrégulière et en apparence capricieuse. Mais quand on examine avec attention l'état des lieux, on reconnaît toujours que partout où il y a eu un changement brusque de direction, ce changement a été provoqué par quelque cause ; le plus souvent par la présence de quelques pièces de métal cachées dans l'épaisseur des murs. Ces pièces agissent pour diriger le fluide, comme les losanges des tubes étincelants. — L'existence de causes déterminantes est bien évidente dans les deux faits qui suivent : le 25 avril 1676, la foudre frappa le clocher de l'abbaye de St-Médard, à Soissons, et parcourut l'édifice, en se divisant et en suivant plusieurs routes très irrégulières, où elle marqua son passage par divers dégâts. Onze ans auparavant, le même édifice avait été foudroyé, et le fluide avait suivi exactement les mêmes routes et produit les mêmes effets. L'autre fait est cité par Arago, dans sa Notice sur le tonnerre : la foudre frappa le clocher d'Antrasme,

près de Laval, pénétra dans l'église, y fondit des dorures, perça des trous, et produisit différents dégâts qui furent réparés avec soin. Un an après, la foudre produisit les mêmes effets, en passant exactement par les mêmes points.

L'influence des masses métalliques est attestée par une foule de faits. La foudre suit les tiges de métal, les tuyaux de descente des toits, les dorures des cadres et des lambris. En 1773, le tonnerre tombe, à Naples, sur l'hôtel de lord Tylney, traverse sept pièces dans lesquelles il y avait plus de 300 personnes, et deux antichambres où attendaient au moins 250 domestiques, et cela sans blesser personne dangereusement, grâce aux dorures des corniches des plafonds, et des baguettes des tapisseries et des fauteuils; le fluide parcourut ces dorures en fondant et volatilisant l'or. — On a vu la foudre suivre un fil de fer, en le fondant en partie; puis, arrivée en un certain point, le quitter brusquement pour traverser un mur, à la hauteur de l'extrémité d'un fusil appuyé du côté opposé. En 1759, à la Martinique, des soldats se réfugient près du mur d'une petite chapelle; deux sont tués par la foudre, qui perce le mur derrière eux à la hauteur d'un système de barres de fer soutenant un tombeau, du côté opposé, etc., etc.

Quand la foudre trouve des corps bons conducteurs et de dimensions suffisantes, elle les suit sans produire de dégâts: ce n'est qu'au moment où elle quitte ces corps, au moment où elle trouve de la résistance, que ses effets désastreux se manifestent. Ainsi, quand le fluide parcourt une barre de fer, on est sûr de trouver des dégâts notables à l'extrémité de cette barre. Ce résultat, facile à concevoir, a été constaté fréquemment.

1368. EFFETS DE LA FOUDRE. — Les effets de la foudre sont semblables à ceux que nous produisons au moyen de nos batteries; seulement, ils sont beaucoup plus intenses. Ainsi, il y a des effets *physiques*, *mécaniques*, *chimiques*, *magnétiques* et *physiologiques*.

I. Effets physiques. — La foudre met le feu aux édifices, aux amas de fourrage. Quelquefois l'incendie se déclare en plusieurs points à la fois, ce qui fait qu'il est difficile de s'en rendre maître.

Les tiges minces métalliques, comme les fils de fer des sonnettes, des sonneries des horloges, sont souvent fondues par la foudre : quand la décharge est faible, les fils sont simplement raccourcis. Sigaud-Lafond cite un coup de foudre (20 juin 1690) qui tortilla un gros fil de fer, comme un crin qu'on aurait approché d'une flamme; effet produit aussi par la décharge des batteries (1336). On a vu les chaînons de grosses chaînes se souder les uns aux autres, de manière à former une barre rigide; les marteaux des horloges se souder à la cloche. Les masses métalliques trop considérables n'éprouvent de fusion qu'à leur superficie, particulièrement aux angles. Les corps altérables par le feu qui sont en contact avec les métaux, restent le plus souvent intacts : c'est ainsi qu'une bourse dans laquelle les pièces de monnaie présentent des traces de fusion, le cuir du fourreau d'une épée, ne sont pas brûlés par le métal en fusion. Ces résultats singuliers, cités par Sénèque, avaient conduit Franklin à

supposer que la foudre produisait des *fusions froides*. Mais il est facile de rendre compte du phénomène, en remarquant que les corps non conducteurs ne manquent pas d'être brûlés lorsque les métaux en contact sont *entièrement* fondus ; et que, dans les cas où ces corps ne présentent que des traces de fusion, les portions fondues sont instantanément refroidies par le contact de celles qui n'ont pas changé d'état, et qui présentent assez de masse. Ce phénomène est analogue à celui qui se passe quand on met un charbon allumé sur un morceau de toile étendu sur une masse métallique (II, 803).

La foudre fond aussi les substances peu conductrices. On a vu des ustensiles de verre être fondus en quelques parties, ou ramollis au point de se déformer par leur propre poids. Des briques sont vitrifiées à la surface. De Saussure au mont Blanc, Ramond au pic du Midi et au mont Perdu, de Humboldt au Mexique, et beaucoup d'autres voyageurs, sur divers sommets, ont observé des portions de roches vitrifiées par la foudre. Ces vitrifications n'ont d'épaisseur que quelques dixièmes de millimètres, mais elles recouvrent parfois des surfaces de près d'un mètre carré, qui sont vernissées d'une espèce d'émail gris ou jaunâtre, dans lequel on distingue des bulles ou boursouflures, de plusieurs millimètres de largeur.

Fulgurites. — Quand la foudre frappe certains terrains sablonneux recouvrant des couches humides, elle fond le sable en formant un tube vitrifié et lisse en dedans, et recouvert en dehors de grains de sable agglutinés. Le diamètre intérieur est de 1 à 50^{mm}; la longueur peut atteindre jusqu'à 10 mètres. Le plus souvent ces *fulgurites* ou *tubes fulminaires* se ramifient à leur extrémité inférieure; leur position est tantôt verticale, tantôt inclinée à l'horizon. Hermann a le premier remarqué de ces tubes, dans la Silésie, en 1711. On les a considérés successivement comme des incrustations faites autour de racines ayant ensuite disparu; comme des cellules construites par des vers antédiluviens; comme des espèces de stalactites. Hentzen paraît les avoir, le premier, attribués à la foudre; opinion que Blumenbach et Fiégler ont développée complétement. Depuis, on a pris la nature sur le fait, c'est-à-dire qu'on a trouvé des tubes encore chauds, à l'endroit où l'on avait vu tomber la foudre. M. Fielder cite deux observations semblables ; M. Hagen a été témoin du fait, et M. Vicke cite un cas observé en 1858 à Oldenbourg.

Nous ajouterons que Beudant, Hachette et Savart ont obtenu des tubes analogues aux fulgurites, en déchargeant la grande batterie du Conservatoire des Arts-et-Métiers de Paris, à travers des couches de verre pilé, ou de sable mêlé de sel pour le rendre plus fusible.

On trouve des tubes fulminaires dans la Silésie, la Prusse orientale, le Cumberland, au Brésil près de Bahia; en général, suivant la remarque de Fiégler, dans les localités où le sable recouvre une couche aquifère.

1369. II. Effets mécaniques. — La foudre brise les corps imparfaitement conducteurs : les pierres volent en éclats, les poutres se divisent en fragments quelquefois très petits et tombant en poussière au moindre contact.

Les arbres sont fendus et divisés en lanières minces, souvent complètement desséchées; le fluide passe ordinairement entre le bois et l'écorce, qui est projetée au loin : c'est là, en effet, que le pouvoir conducteur est le plus prononcé, à cause de l'accumulation de la sève. Les cloisons, les murs sont perforés. Souvent la foudre soulève le pavé des églises, au-dessous duquel elle trouve une couche humide; elle renverse des pans de muraille, des portions d'édifices, en projetant les débris à de grandes distances : en 1762, en Cornouailles, le tonnerre démolit la tourelle d'une église et lança à 55^{m} une pierre du poids de plus de 100 kilos; en 1852, à Cherbourg, la foudre brisa le bas-mât d'un navire désarmé; un fragment de 2^{m} de long et de 20^{cm} d'équarrissage au gros bout, est lancé avec une telle force, qu'il s'engage par le gros bout, en faisant un trou semblable à celui d'un boulet de canon, dans une cloison en chêne de 3^{cm} d'épaisseur placée à 80^{m} de distance.

La foudre produit aussi des phénoménes de transport : des objets assez lourds se trouvent déplacés; des personnes foudroyées ont été quelquefois lancées à des distances de 20 à 30^{m}. En 1809, prés de Manchester, un mur pesant plus de 26000 kilos fut arraché de ses fondements et déplacé de 3^{m} à l'une de ses extrémités, et de plus de 1^{m} à l'autre. Ces effets prodigieux s'expliquent par les principes de M. Pouillet (1338), quand on considère l'énorme tension de l'électricité qui produit la foudre.

1370. III. Effets chimiques. — On prévoit facilement que la foudre doit produire une foule de décompositions dans les substances qu'elle rencontre sur son passage. Elle transporte ensuite les éléments qu'elle a séparés, et les dépose en poussiéres impalpables sur les corps qu'elle traverse, et dans lesquels elle prend de nouvelles substances, qu'elle va déposer plus loin. C'est ainsi que l'on trouve des taches ferrugineuses, des couches d'une épaisseur imperceptible de soufre, d'oxyde de cuivre, etc., sur les différents objets traversés par la foudre, et particuliérement dans l'intérieur des ouvertures qu'elle pratique. M. Fusiniéri a appelé l'attention, sur ces transports qu'il rapproche de ceux qu'il a produits au moyen des batteries (1337).

L'éclair qui traverse l'atmosphère y détermine la combinaison d'une petite quantité d'azote et d'oxygéne (1339). L'acide azotique formé se combine ensuite avec des bases, par exemple l'ammoniaque, qui peuvent se trouver en petite quantité dans l'air. Aussi les gouttes de pluie sont-elles quelquefois acides pendant les orages. M. Liebig ayant analysé les eaux de pluies recueillies dans des vases de porcelaines à 77 époques différentes, trouva, dans 17 échantillons qui provenaient de pluies d'orages, de l'acide azotique combiné à de l'ammoniaque ou de la chaux. Des 60 autres échantillons, 2 seulement donnérent des traces presque imperceptibles de cet acide. C'est à l'acide nitrique, répandu dans l'atmosphère après les orages, qu'on attribue l'origine des salpêtriéres naturelles. M. Boussingault a en effet remarqué, en Amérique, aux environs de Rio-Bamba, que le salpêtre se forme plus abondamment dans les localités où il tonne souvent. Ainsi, pour reproduire un rapprochement qui a

souvent été fait, la foudre serait l'origine du salpêtre, qui forme la base de la poudre à canon, cette autre foudre, dont l'homme fait un si cruel usage.

Odeurs développées par la foudre. — La foudre laisse souvent après son passage une fumée plus ou moins épaisse, provenant des matières atteintes, calcinées ou décomposées, et accompagnée d'une odeur forte qu'on désigne ordinairement sous le nom d'*odeur de soufre*. C'est surtout dans les édifices, que cette fumée et cette odeur sont prononcées. Parmi toutes les substances que la foudre rencontre, il doit s'en trouver souvent qui renferment du soufre; il peut donc se faire qu'il y ait, dans certains cas, un peu d'acide sulfureux mêlé à la fumée suffocante qui reste après l'accident. Mais, malgré l'assertion presque unanime des observateurs, nous ne pensons pas que l'odeur soit celle de l'acide sulfureux ; car, dans le dépouillement d'une quantité considérable de cas de foudre, nous n'en avons pas trouvé un seul où il fût dit que la fumée dégagée *excitait la toux*, et l'on sait que c'est là un des effets de l'acide sulfureux. Dans un ou deux cas seulement, on parle d'une vapeur qui prenait à la gorge; mais c'est ce que font toutes les fumées provenant de la décomposition des substances organiques. M. Boussingault a été souvent à même d'observer la foudre : sept fois elle a frappé des arbres en sa présence ; il a vu un nègre tué sous ses yeux ; à Zupia, sa maison a été incendiée ; en Europe, le tonnerre est tombé dans sa chambre tout près de lui, et jamais il n'a senti l'odeur de l'acide sulfureux. Il compare l'odeur qu'il a observée à celle que dégage le bois que l'on distille, et il pense que si les observateurs parlent presque toujours d'odeur de soufre, c'est à cause de l'habitude que l'on a de désigner ainsi toutes les odeurs fortes et nauséabondes qu'on ne peut rapporter à une cause connue.

Il peut se faire aussi que, en plein air, les coups de foudre soient accompagnés de l'odeur de l'*ozone* (1341), quand cette odeur n'est pas déguisée par celle de la fumée dégagée des corps atteints par le météore.

1371. IV. Effets magnétiques. — Quand la foudre frappe un navire, il arrive souvent que les pôles de l'aiguille des boussoles sont renversés, de manière que l'extrémité marquée *nord* se tourne vers le sud; d'autres fois, les aiguilles perdent simplement leur magnétisme. Quelquefois enfin, l'axe magnétique est déplacé et fait un angle avec l'axe de figure; quand cet angle est de 90°, l'aiguille se dirige de l'est à l'ouest. Il est donc important de vérifier les boussoles, dans les navires qui viennent d'être foudroyés. Arago cite un vaisseau génois qui, croyant marcher vers le nord, vint se briser sur la côte d'Afrique, près d'Alger, parce que les pôles de sa boussole avaient été renversés à la suite d'un coup de tonnerre.

Le fer, les instruments d'acier, sont souvent aimantés quand la foudre frappe des objets voisins. Le 19 mai 1819, la foudre entra dans la boutique d'un cordonnier, à Obergunzbourg, en Souabe, et tous ses outils se trouvèrent si fortement aimantés, qu'il perdait beaucoup de temps à les séparer les uns des autres, quand il voulait s'en servir. L'aimantation des diverses pièces de fer

et d'acier qui peuvent se trouver dans les navires, peut apporter des perturbations notables aux indications des boussoles. Les pièces d'acier des chronomètres peuvent aussi être aimantées par la foudre. Duperrey a vu la marche de ses chronomètres tellement accélérée par cette cause, que la longitude calculée au moyen de leurs indications, correspondait à un point placé à 40 lieues dans les terres de l'Australie, auprès desquelles il naviguait.

1372. V. Effets physiologiques. — La foudre renverse, blesse, tue les hommes et les animaux. On remarque généralement que les cadavres entrent rapidement en putréfaction. Quelquefois, on ne voit sur le corps aucune marque extérieure du passage du redoutable météore; d'autres fois, de longs sillons où la peau est enlevée, des plaies saignantes, des perforations, des brûlures, se montrent en différents points du corps. Quand il n'y a pas de marques extérieures, l'autopsie indique souvent une congestion dans le cerveau et un épanchement du sang hors des vaisseaux lésés. On a pu constater aussi que ce liquide, extrait des veines, avait perdu la propriété de se coaguler. Souvent les habits sont enflammés, les parties métalliques qu'ils contiennent, fondues ou arrachées. Le fluide passe fréquemment entre les vêtements et la surface du corps; il trouve là une couche d'air humide des produits de la transpiration, par laquelle il s'écoule avec facilité. Cela explique pourquoi la surface intérieure des vêtements présente quelquefois seule des traces de brûlures.

Les personnes foudroyées sont renversées sans entendre le coup ni voir l'éclair, comme l'ont toujours attesté celles qui sont revenues à la vie; elles conservent généralement pendant longtemps une grande faiblesse musculaire, qui indique que le système nerveux est violemment ébranlé. Quand le tonnerre tombe au milieu d'une foule, il frappe de préférence certains individus, qui ne semblent pas cependant placés d'une manière plus défavorable que les autres. Il y a peut-être là un effet de leur organisation. Nous avons vu que certains individus ont l'épiderme assez épais pour arrêter la décharge d'une bouteille de Leyde (1327); elles seraient préservées, par un effet analogue à celui que produisent certains vêtements : on a vu, en effet, la foudre glisser, sans leur faire de mal, sur des personnes portant des vêtements de soie, ou couvertes d'un manteau de toile cirée.

Nous avons parlé (1328) des essais que l'on a tentés pour guérir les paralysies au moyen de la commotion électrique; il est facile de saisir la liaison des deux faits suivants avec les résultats qu'on a obtenus : en 1762, à Kent, la foudre tombe dans la chambre du pasteur Winter paralysé depuis un an à la suite d'une attaque d'apoplexie; il reçoit une violente commotion, après laquelle il se trouve radicalement guéri. En août 1819, à Niort, un malade atteint depuis plusieurs années d'un rhumatisme au bras gauche, voit le mal disparaître après qu'il a été renversé par la foudre.

Les troupeaux de moutons sont souvent foudroyés; ce que l'on attribue à la colonne de vapeur qui s'élève de leur corps, pendant qu'ils se pressent les uns contre les autres, poussés par la frayeur.

1373. Choc en retour. — Un voyageur ou un animal peuvent être renversés ou tués au moment où la foudre éclate à une très grande distance du point où ils se trouvent. Ce fait, connu sous le nom de *choc en retour*, a été expliqué très simplement par milord Mahon, en 1779. Considérons un point B (*fig.* 1021) placé au-dessous d'un nuage fortement chargé d'électricité positive; il y aura décomposition par influence dans l'électricité neutre des objets placés en B, le fluide négatif sera attiré vers la surface de la terre, et le fluide positif refoulé dans ses profondeurs. Si la foudre tombe en P, le nuage sera déchargé, et les fluides décomposés en B se rejoindront subitement à travers les corps terrestres, de manière à faire éprouver une violente commotion aux êtres animés qui pourraient se trouver en ce point, pendant que ceux qui seront placés en c n'éprouveront rien, leur distance au nuage pouvant être plus grande que AB, soit à cause de la configuration du sol, soit à cause de la forme même du nuage. Il pourra arriver aussi que l'électricité soit accumulée aux extrémités du nuage, s'il a une forme allongée (1302). Le choc en retour a lieu lorsque les nuages se déchargent sur le sol; ce qui indique qu'ils en sont assez rapprochés pour exercer sur lui une influence considérable.



Fig. 1021.

On a des exemples bien constatés d'hommes et d'animaux tués par le *choc en retour*. On n'aperçoit ordinairement aucune lésion sur les cadavres, si ce n'est quelquefois à la plante des pieds, surtout quand les chaussures sont garnies de clous. Il n'y a pas d'exemple que nous sachions, que le choc en retour ait occasionné des incendies; cependant cela semble possible d'après le fait rapporté par Brydone et cité plus bas (1377), et aussi d'après l'expérience suivante : on fait communiquer avec le sol, le bouton d'un pistolet de Volta (1251) isolé et placé près d'une machine électrique. Au moment où l'on décharge les conducteurs, le gaz fait explosion ; l'électricité refoulée dans le sol rentrant par le bouton, en produisant l'étincelle intérieure.

1374. Du nombre des victimes de la foudre. — Dans les grandes villes, où il y a un très grand nombre d'édifices élevés, la chance d'être foudroyé est peu à redouter; mais il n'en est pas de même dans les villages et dans les campagnes. Il résulte d'un relevé fait par M. Boudin dans les archives du ministère de la justice, qu'il y a eu, en France, 1308 personnes *tuées raide* par la foudre, de 1835 à 1852. Si l'on y joint celles qui ont survécu quelque temps à l'accident, et celles qui n'ont été que blessées, on arrive à un nombre au moins triple. Le nombre 1308 donne une moyenne de 73 par an. Le

nombre absolu, pour 1835, a été de 111, et pour 1847, de 108. Les départements les plus élevés au-dessus de la mer, ceux dont le sol est montagneux, ont fourni le plus de victimes. Ainsi, entre 1835 et 1852, le département du Cantal a eu 20 morts par la foudre ; l'Aveyron, 24 ; la Corse, 27 ; la Saône-et-Loire, 38 ; la Haute-Loire, 44 ; le Puy-de-Dôme, 48 ; tandis que l'Eure, l'Eure-et-Loir et le Calvados, n'en ont eu que 2 ou 3. On a vu jusqu'à 9 personnes tuées par le même coup : ainsi, le coup de foudre qui frappa l'église de Châteauneuf-les-Moustiers, dans les Basses-Alpes, tua 9 personnes et en blessa plus de 80. Tout dernièrement, à la fin de juin 1861 et dans l'espace de 8 jours, on a relevé 33 coups de foudre, dont chacun a tué ou blessé grièvement au moins une personne.

Dans les autres pays de l'Europe, M. Boudin trouve, pour le nombre annuel moyen des individus tués raide par la foudre : en Belgique, 3 ; en Suisse, 9,64 ; en Angleterre, 22. Ces nombres sont évidemment des minimum ; que d'accidents qui n'ont pas été constatés, que de morts dont la cause n'a pas été enregistrée !

1375. Des précautions à prendre en temps d'orage. — On voit que la chance d'être foudroyé n'est pas aussi méprisable qu'on l'a dit quelquefois. Cette chance augmente énormément au moment d'un orage. Il n'est donc pas inutile de faire connaître quelques précautions à prendre dans ce cas ; presque toutes ont été indiquées par Franklin.

Dans les maisons, il faut éviter la proximité des masses métalliques (1367) se débarrasser de celles qu'on a sur soi, s'éloigner des cheminées, des ouvertures (1366). On est plus en sûreté au milieu d'une chambre que près des murs et des angles, où se réfugient souvent les personnes timorées. Il y a plus de danger à se grouper en un même point qu'à se tenir séparés les uns des autres. Les obstacles les plus faibles arrêtant quelquefois le passage du fluide, il est bon de tenir les fenêtres et les portes fermées.

Au-dehors, il faut éviter de se mettre à l'abri auprès des clochers, des édifices élevés, qui sont souvent foudroyés ; *surtout de se placer sous les arbres isolés :* sur 107 personnes tuées par la foudre de 1843 à 1854, M. Boudin en trouve 21 tuées sous des arbres, et ce n'est là qu'un minimum, car souvent le lieu de l'accident n'est pas précisé. En temps d'orage, les personnes réunies dans les églises de campagne dépourvues de paratonnerre, sont très exposées. En 1718, dans un seul orage, le tonnerre tomba sur 24 églises, comprises entre Landerneau et Saint-Pol de Léon.

En rase campagne, on doit éviter les parties élevées du terrain. Si l'orage est violent et les nuages bas, il faut tâcher de trouver un grand arbre et se placer à une distance de son pied égale à peu près à sa hauteur ; si les branches s'étendent beaucoup en largeur, la distance devra être plus grande. On se trouvera, ainsi préservé par l'arbre, qui sera frappé de préférence, à cause de sa hauteur. Il ne paraît pas, du reste, qu'il y ait danger à courir pendant l'orage ; ce ne serait qu'autant que la foudre viendrait à tomber dans l'espace d'air raréfié

qu'on laisse derrière soi, que, *peut-être*, le fluide pourrait se détourner pour s'élancer à travers cet espace.

1376. GLOBES FULMINANTS. — En temps d'orage et après un coup de tonnerre, on voit quelquefois près du sol des globes lumineux, qui se meuvent avec lenteur, semblent éviter les objets terrestres, en allant çà et là, puis tout à coup éclatent avec fracas, en lançant autour d'eux des traits sinueux éblouissants, et en brisant avec violence tout ce qui se trouve à proximité, comme pourrait le faire l'explosion d'une mine. Ces globes laissent quelquefois à leur suite une traînée d'étincelles ; leur éclat est comparé à celui du fer rouge, à celui de la lune ; leur diamètre paraît être généralement de 2 ou 3 à 30 ou 40 centimètres ; ils ne semblent pas avoir de préférence pour les bons conducteurs. Cette espèce de foudre, désignée sous les noms de *foudre globulaire*, *tonnerre en boule*, *globe fulminant*, était connue de Senèque ; mais son existence n'était pas admise dans la science, lorsque Arago en a prouvé la réalité, et en a fait une *troisième classe* d'éclairs. Les détails suivants, publiés par M. Babinet, donneront une idée des circonstances qui précèdent et accompagnent le plus souvent l'apparition des globes fulminants [1].

Un tailleur, logé près du Val-de-Grâce, à Paris, était assis devant sa table, quand il vit le châssis garni de papier qui fermait la cheminée, s'abattre doucement, et un globe de feu gros comme la tête d'un enfant, en sortir lentement et se promener dans la chambre à quelque distance des briques du pavé. Ce globe s'approcha des pieds de l'ouvrier qui, pour en éviter le contact, dérangea ses pieds, mais sans précipitation. Après quelques évolutions vers le milieu de la chambre, le globe s'éleva verticalement à la hauteur de la tête de l'homme, qui dut se redresser et se pencher sur sa chaise, pour éviter d'être touché au visage. Il n'éprouva, du reste, aucune impression de chaleur. Puis le globe s'allongea un peu, et se dirigea obliquement vers un trou fermé par une feuille de papier, et pratiqué à 1^m au-dessus de la tablette de la cheminée ; le globe détacha le papier sans l'endommager, entra dans le canal de la cheminée, et, arrivé tout en haut, éclata avec fracas en projetant à une grande distance les débris de la partie supérieure.

Il est à remarquer que de semblables globes ont presque toujours été signalés dans les cas de foudre les plus désastreux. Lors de l'accident qui détruisit entièrement, en 1718, l'église de Gouesnon, près de Brest, on vit trois globes de feu, qui se réunirent en un seul, lequel traversa le mur de l'église, et éclata dans l'intérieur, en faisant sauter le toit et les murs.

Les globes fulminants ne finissent pas toujours en éclatant. En 1841, à Milan, on vit, pendant un violent orage, un globe de feu ayant la grandeur et l'éclat de la lune, parcourir une rue avec assez de lenteur pour que des curieux aient pu le suivre en marchant rapidement. Ce globe, s'élevant graduellement, vint heurter la croix d'une église, et là disparut subitement, en

[1] *Comptes-rendus des séances de l'Académie des sciences* de Paris, t. XXXV, p. 5.

faisant entendre un bruit sourd semblable à un coup de canon entendu de très loin. Le 17 mai 1852, le tonnerre tomba à 1 kilomètre de la station de Beuzeville, sur le chemin de fer du Hâvre. Des arbres masquaient le point foudroyé; mais aussitôt on en vit sortir un globe de feu suivi d'une traînée d'étincelles, et s'avançant avec lenteur. Ce globe vint se poser « comme un oiseau » sur les fils du télégraphe électrique, et disparut subitement. Au même moment, les appareils télégraphiques de la station tournèrent avec rapidité, et on en vit jaillir une foule d'étincelles, ce qui montre que l'électricité du globe s'était écoulée par le fil.

Les globes fulminants n'ont pu être expliqués, et l'on n'est pas parvenu à les imiter artificiellement. Il est à remarquer que, depuis qu'Arago les a distingués comme espèce, de la foudre ordinaire, les relations plus détaillées signalent presque toujours cette circonstance, que l'apparition du globe de feu a été précédée d'un coup de foudre. S'il en était toujours ainsi, il pourrait se faire que les globes fulminants fussent un effet ou un produit de la foudre, et non la foudre elle-même. On est porté, à les regarder comme formés de matière pondérable fortement chargée d'électricité.

1377. Actions par influence des nuages orageux sur la terre. — Les nuages électrisés peuvent produire par induction, sur les objets terrestres, divers effets remarquables, même quand ils sont trop élevés pour donner des coups de foudre. Arago en cite quelques exemples : on voit certaines sources jaillir avec plus d'abondance quand le temps est orageux. La fontaine dite *Cuve de César*, au mont d'Or, en Auvergne, lance deux colonnes d'eau verticales, qui bouillonnent avec un bruit particulier; et, d'après le Dr Bertrand, ce bruit est beaucoup plus fort en temps d'orage. Brugnatelli a vu, à la suite d'un orage, les eaux d'un lac du territoire de Lucques devenir blanches et troubles, et les jours suivants il trouva sur ses bords une foule de poissons morts. Certaines inondations observées après des orages, ont été attribuées, en partie, à des masses d'eau considérables, sorties des entrailles de la terre sous l'influence de l'attraction électrique des nuages.

M. Liais a observé, en 1852, à Cherbourg, un ras de marée, pendant lequel la mer a baissé, en 10 minutes, de la quantité dont elle baisse ordinairement en 2 heures, et cela au moment où un orage intense commençait à s'éloigner de la ville; on l'a attribué à l'action des nuages, qui attiraient les eaux vers la pleine mer. On a vu, pendant un orage, l'eau de la mer s'élancer en forme de cône, puis retomber en écumant, pour être soulevée de nouveau.

Le fait suivant, cité par Arago, d'après Brydone qui en a recueilli les détails, prouve, d'une manière frappante, l'existence d'une perturbation profonde, produite par les nuages orageux dans l'état électrique du sol. Le 19 juillet 1785, au haut d'une montée, près de Coldstream, on vit tomber raide mort, un charretier qui conduisait un tombereau chargé de houille. Les deux chevaux qui traînaient ce tombereau eurent le même sort, et l'on entendit une explosion semblable à plusieurs coups de fusil. Le sol se trouva percé de deux trous, de

5cm de diamétre, à l'endroit où reposaient les roues, dont le cercle de fer présentait des traces de fusion au point de contact. Le bois était aussi endommagé en plusieurs endroits, et une partie du charbon dispersée au loin; plusieurs fragments présentaient des traces de calcination. Cet événement eut lieu après qu'un orage violent se fut éloigné, et l'on n'aperçut aucun éclair au moment de la catastrophe. Il faut remarquer qu'une grande sécheresse régnait depuis longtemps dans le pays.

Feu Saint-Elme. — L'action par influence exercée par les nuages orageux, produit souvent, aux parties saillantes des corps terrestres, des *aigrettes lumineuses* accompagnées quelquefois d'un léger pétillement, comme celles que produisent les machines électriques. Ces aigrettes ont été souvent observées par les anciens, qui en tiraient divers présages. César vit le fer des lances d'une légion devenir lumineux par une nuit orageuse. Des voyageurs ont vu des aigrettes s'échapper, en temps d'orage, de leurs cheveux, des bords de leur chapeau, des extrémités de leurs doigts quand ils élevaient la main. Les sommités des édifices, les branches des arbres présentent aussi de ces lueurs sifflantes. Quelquefois, au lieu d'aigrettes divergentes, on ne voit qu'une petite lueur globuleuse qui entoure les pointes; ce qui semble indiquer qu'elles laissent échapper du fluide négatif (1287). Les aigrettes se montrent assez souvent sur les navires, aux extrémités des mâts et des vergues, aux filaments des cordages. Les anciens les désignaient, dans ce cas, sous le nom de *Castor* et *Pollux;* les marins modernes les appellent *feux Saint-Elme*, ou quelquefois *Saint-Nicolas*, *Sainte-Claire*, *Sainte-Hélène*. Les Portugais les nomment *corpo-santo*, et les Anglais, *comozants*. Les marins attachent une foule d'idées superstitieuses à l'apparition de ces aigrettes, et les regardent généralement comme un présage du retour du beau temps.

Au lieu de simples aigrettes, on a vu quelquefois des lueurs de grandes dimensions, et répandant un éclat assez vif pour qu'on ait pu les comparer à des flammes. Maffei étant au château de Fordinovo, en 1713, vit, pendant un orage, apparaître à la surface du pavé d'une salle du rez-de-chaussée, une flamme vive trés agitée qui disparut subitement comme elle était venue; au même instant il entendit un bruit assez fort, des plâtras se détachèrent de la voûte, et il ressentit derriére l'épaule une sorte de chatouillement électrique. Lors d'un coup de tonnerre qui frappa une tour sur la place de Casalaone, en 1731, les habitants virent un grand feu qui précéda l'explosion. L'abbé Jérôme Lioni de Cénéda observa, prés de Venise, pendant un orage des plus furieux, une flamme très vive qui s'éleva rapidement de terre à une hauteur de deux coudées, et disparut subitement avec une violente explosion. En janvier 1850, M. L. Fleury vit, à Cherbourg, par un temps d'orage, une flamme trés vive, comme scintillante, paraissant reposer sur l'horizon, et se balançant de côté et d'autre; elle s'éteignit sans explosion.

1378. Des foudres progressives et ascendantes. — Le plus souvent, l'explosion de la foudre est instantanée, et le trait électrique existe au même

moment dans tous les points de son trajet à travers l'air et l'édifice foudroyé. Dans ce cas, on ne peut pas dire que le tonnerre *tombe* plutôt qu'il ne *monte;* les deux fluides vont l'un vers l'autre, et se réunissent instantanément dans toute l'étendue du trait lumineux. Il résulte cependant d'un grand nombre de faits recueillis par des observateurs expérimentés et dignes de foi, que le trait électrique peut s'élancer d'un mouvement progressif, assez lent pour qu'on puisse le suivre de l'œil, et qu'on ait pu le comparer à une fusée d'artifice. Souvent, on a vu ces traits marcher de bas en haut; on leur a donné alors le nom de *foudres ascendantes*. La question des foudres ascendantes a été des plus controversées. Maffei et Bertholon, pour avoir voulu soutenir que la foudre s'élance *toujours* de bas en haut, ont porté à contester le phénomène, et pendant longtemps on a cessé de s'en occuper. Aujourd'hui que la découverte de la polarisation électrique moléculaire suffit, suivant nous, à l'expliquer, au moins dans son ensemble, il est opportun de rappeler les observations qui en prouvent l'existence.

Nous allons d'abord citer, d'aprés Bertholon[1], quelques cas de foudres ascendantes; nous ne nous occuperons que des observations où l'on a *vu* le phénoméne, laissant de côté celles où l'on a déduit la marche ascendante de la foudre, de certains effets produits évidemment de bas en haut, effets que l'on pourrait attribuer à l'expansion de la vapeur d'eau, produite instantanément à trés haute tension, par la décharge. En 1725, Séguier vit, prés de Nîmes, une large flamme s'élever de terre et disparaître bientôt avec explosion. Le même observateur a vu souvent, dans la plaine qui s'étend entre Vérone et Mantoue, des traits éblouissants s'élever de la terre trés rapidement, en ligne droite, et disparaître aussitôt; la plupart étaient suivis du bruit du tonnerre. Bouguer a observé des traits semblables qui sortaient des montagnes et se portaient vers des nuages orageux que le vent poussait vers leurs flancs. Chappe et Cassini, étant à l'Observatoire de Paris, le 6 août 1767, virent une flamme très brillante qui s'élevait comme une fusée, en diminuant d'épaisseur et d'éclat à mesure qu'elle montait. Le même jour, un trait de feu s'élança de terre vers l'extrémité d'un mât, et laissa des traces de fusion sur des piéces métalliques qui le surmontaient. Lalande, Beccaria, citent des faits analogues. En 1776, Cotte vit distinctement, à différentes reprises, deux courants de feu partir, l'un de la terre et l'autre des nuages, pour se réunir avec explosion. Bertholon a été témoin de foudres ascendantes : étant, entr'autres, à quelques lieues de Toulouse, en 1772, il vit plusieurs fois des lames de feu s'élancer de la terre en serpentant, et éclater à une certaine hauteur; il était accompagné de plus de 40 personnes, qui constatèrent également ces phénomènes. Une autre fois, il put observer, pendant plus d'une demi-heure, un grand nombre d'éclairs qui partaient de la terre ou de la mer, et se portaient avec rapidité vers les nuages. En 1843, Peltier a vu, dans la plaine de Ruelle et de Nanterre, deux sillons

[1] *Journal de physique*, t. X (1777), p. 179.

de feu qui semblaient distants de quelques mètres, s'élancer du sol vers des nuages orageux. M. Kaemtz a vu plusieurs fois deux éclairs partir de deux nuages et se réunir au milieu de l'espace qui les séparait.

De tous ces faits, constatés par des observateurs habiles et consciencieux, on est en droit de conclure que la décharge électrique peut avoir lieu progressivement, et, notamment, se faire de bas en haut. On ne saurait donc trop recommander aux observateurs de porter leur attention sur ce point. Du reste, une fois le fait admis, il n'est pas impossible d'en rendre compte, en le comparant aux résultats des expériences de cabinet[2].

Nous avons vu, en effet, que l'électricité pénètre jusqu'à une certaine profondeur dans les plus mauvais conducteurs, par des décharges successives entre les molécules polarisées, surtout quand il se trouve du côté opposé, un corps conducteur non isolé (1349). Ces décharges moléculaires, dans un milieu gazeux comme l'air, expliquent les aigrettes produites par l'écoulement continu de l'électricité (1287). Les éclairs progressifs peuvent être regardés comme le résultat de décharges successives moléculaires, se propageant très rapidement dans l'air rendu sensiblement conducteur par l'humidité qu'il contient, et formant des traînées lumineuses, qui s'avancent l'une vers l'autre, entre un nuage et la terre, jusqu'à ce qu'il y ait rencontre, et explosion par les grandes quantités de fluides qui se combinent directement alors. La grande longueur de ces traînées s'explique par l'énorme tension des électricités. Si l'on n'a pas toujours aperçu les deux sillons de feu allant l'un vers l'autre, cela peut provenir de ce que l'une des électricités produit des effets lumineux plus intenses que l'autre.

On peut, du reste, constater dans diverses circonstances la marche progressive de l'étincelle. Si l'on fait tomber des étincelles sur l'extrémité d'un tableau magique, il se forme souvent des serpentaux qui n'atteignent pas le bord opposé, et que l'on voit distinctement s'allonger rapidement en s'amincissant. Si l'on présente la main au conducteur d'une machine, de manière à obtenir une large aigrette, il n'est pas rare de voir jaillir au milieu de cette aigrette une étincelle violette qui s'allonge rapidement en serpentant, s'amincit en pointe fine et s'évanouit avant d'arriver à la main. En même temps on entend un craquement sourd, tout différent du bruit clair que produit l'étincelle ordinaire. Enfin, si l'on fait tomber de fortes étincelles sur l'extrémité d'une longue bande de verre couverte d'aventurine, dont l'autre extrémité est garnie d'une lame métallique communiquant avec le sol, on voit des serpenteaux partant des deux extrémités, s'élancer les uns vers les autres sans se joindre, et s'allonger avec une grande vitesse. L'espace que ne franchissent pas ces petits éclairs est rempli d'une multitude de points brillants. Il est facile de saisir le rapport qui existe entre ces divers phénomènes et les éclairs progressifs.

[1] *Mémoires de l'ac. des sc. de Toulouse*, 5e série (1858), t. II, p. 479.

II. Des moyens de se garantir de la foudre. — Paratonnerres.

1379. — Depuis l'antiquité la plus reculée, on a cherché les moyens de se préserver des effets de la foudre. Les pratiques fondées sur des idées superstitieuses ne doivent pas nous occuper. D'après Pline, les anciens pensaient que la foudre ne pénétrait pas à plus de 2 mètres dans la terre ; aussi, voyons-nous Auguste se réfugier sous des voûtes épaisses, en temps d'orage. Kœmpfer rapporte que les empereurs du Japon se plaçaient sous des réservoirs pleins d'eau. Franklin conseille de se coucher dans un hamac suspendu par des cordons de soie. Romas recouvrait le plafond et les murs d'une chambre, d'un treillage en fil de fer, dont toutes les parties inférieures étaient réunies par un gros fil de fer communiquant avec le sol.

Volta pensait que de grands feux allumés dans la campagne pourraient décharger les nuages ; nous savons, en effet, que les gaz chauds qui s'échappent d'une flamme déchargent les conducteurs de nos machines (1188). Mais il faudrait que les nuages fussent très bas pour que la colonne d'air chaud pût monter jusqu'à eux, et, d'ailleurs, l'expérience n'a pas généralement justifié l'emploi de cette méthode. On a proposé aussi de tirer le canon pour diviser les nuages orageux ; mais il résulte d'une discussion faite par Arago, dans sa Notice sur le tonnerre, que ce moyen n'a aucune efficacité.

Dans beaucoup de pays, on a coutume de sonner les cloches. Cette pratique est d'abord venue d'idées religieuses. Plus tard, on a voulu la justifier scientifiquement ; mais de nombreux accidents ne tardèrent pas à ouvrir les yeux des hommes éclairés, et, dès le commencement du dernier siècle, on trouve des arrêts qui défendent de sonner les cloches en temps d'orage. Un revirement d'idées s'est même fait à cet égard, et on a prétendu que de sonner les cloches attirait le tonnerre. Aujourd'hui, l'opinion générale est que cette pratique n'a pas d'influence sur le météore. Deslandes cite bien l'orage qui ravagea la Bretagne, en 1718, entre Landerneau et Saint-Pol-de-Léon, dans lequel le tonnerre tomba sur 24 clochers où l'on sonnait, tandis que les autres ne furent pas atteints ; mais ce dernier point n'est pas bien prouvé ; souvent, la foudre ne laisse pas de traces de son passage, surtout quand elle trouve un conducteur continu, comme celui que forment la cloche et la corde qui y est attachée, laquelle est ordinairement accrochée au mur par son extrémité inférieure ; les clochers où l'on ne sonnait pas peuvent donc avoir été foudroyés sans qu'on s'en soit aperçu, tandis que, pour les autres, les sonneurs ayant reçu le choc électrique, le phénomène ne pouvait passer inaperçu. Cependant l'*usage de sonner les cloches doit être interdit par tous les moyens possibles*, parce que les sonneurs sont exposés à un danger imminent. Déjà, en 1785, on avait constaté en Allemagne que, dans l'espace de 33 ans, la foudre avait frappé 386 clochers, et avait tué 120 sonneurs.

1380. DES PARATONNERRES. — Lorsque Franklin eut découvert le pouvoir des pointes, il songea à s'en servir pour décharger les nuages de leur électricité. Nous avons parlé des expériences qui furent faites à cette époque, une des plus brillantes de la physique, soit avec des barres terminées en pointe, soit avec des cerfs-volants. L'établissement des premiers *paratonnerres* eut lieu peu de temps après, à Philadelphie. Un paratonnerre consiste en une barre de fer verticale terminée en pointe, *ab* (*fig.* 1022), nommée *la tige*, communiquant intimement avec le sol, au moyen d'un *conducteur* métallique non interrompu *bcde*. Cet appareil se place sur le point le plus élevé de l'édifice que l'on veut préserver.

Double rôle du paratonnerre. — 1° Le rôle le plus important d'un paratonnerre consiste à préserver l'édifice des effets de la foudre. Il est évident que l'éclair frappera de préférence l'extrémité du paratonnerre, parce que c'est le point le plus élevé, et que la décomposition par influence s'y fait plus complétement que dans le bois ou la pierre. Le fluide trouvant ensuite un conducteur continu ira se perdre dans le sol, sans occasionner de dégâts.

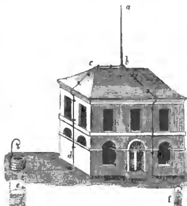


Fig. 1022.

Espace préservé. — L'efficacité du paratonnerre ne s'étend qu'à une certaine distance. Charles admettait, d'après un grand nombre d'observations, et on admet encore aujourd'hui, qu'un paratonnerre préserve les points placés dans un rayon égal au double de sa hauteur au-dessus du plan horizontal considéré. Il faut donc armer les grands édifices de plusieurs paratonnerres, et les placer à une distance les uns des autres égale à quatre fois leur hauteur. Comme on a vu la foudre frapper la face latérale de certains édifices, on dispose parfois, sur les bords du toit, des paratonnerres inclinés destinés à les protéger contre ces coups obliques.

Quand l'édifice contient de grandes masses métalliques, comme des gouttières, des parties de toiture en plomb ou zinc, la quantité de fluide décomposée dans ces masses étant bien plus considérable que celle qui est décomposée dans le paratonnerre, il peut arriver que la foudre les frappe quoique placées dans le rayon préservé. Pour éviter les conséquences de cet accident, on fait communiquer ces masses avec le sol par le conducteur du paratonnerre. Quand il ne s'agit que de préserver l'édifice, ces masses métalliques, quand elles sont placées au haut du toit et qu'elles sont en communication avec le sol, consti-

tuent un vrai paratonnerre. Par exemple, une toiture en zinc communiquant avec le sol, forme un appareil protecteur des plus efficaces. C'est ainsi que des édifices ont été quelquefois préservés par les plaques de plomb garnissant les angles du toit et communiquant avec le sol par des tuyaux de descente soudés aux gouttières et s'enfonçant dans des puits.

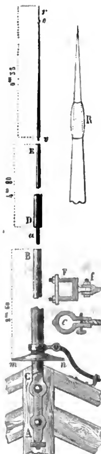


Fig. 1023.

2° Action préventive. — Le paratonnerre a aussi pour mission de neutraliser peu à peu l'électricité des nuages, et de diminuer leur tension, de manière à prévenir l'explosion de la foudre. En effet, l'électricité du nuage décompose par influence le fluide neutre du paratonnerre, refoule dans le sol le fluide de même nom, et attire le fluide do nom contraire. Ce dernier *s'échappant par la pointe*, se porte sur le nuage, vers lequel il est attiré, et neutralise le fluide qui s'y trouve. La sortie de l'électricité par la pointe produit souvent une aigrette visible dans l'obscurité, et le flux d'électricité qui descend dans le sol produit quelquefois une lueur plus ou moins prononcée qui enveloppe le conducteur pendant les forts orages. Aussi est-il dangereux de s'approcher de ce conducteur en temps d'orage; car, si le fluide éprouvait quelque difficulté à pénétrer dans le sol, une partie pourrait se détourner sur l'imprudent trop rapproché, et le frapper de mort.

1381. De la construction des paratonnerres. — En 1823, une commission de l'Académie des sciences de Paris publia les règles à suivre dans la construction des paratonnerres. Depuis quelques années, le fer étant entré en grande quantité dans les édifices, comme toiture, charpente, poutres, colonnes...., une nouvelle commission a été chargée, en 1854, d'ajouter quelques prescriptions nouvelles à celles qu'avait publiées la commission de 1823 [1].

I. Tige. — La tige du paratonnerre est une barre de fer à laquelle on donne plus d'épaisseur à sa base. Quand la hauteur est de 8 à 10 mètres, on donne à la base, supposée carrée, de 54 à 63 millimètres de côté. La tige est ordinairement composée de deux parties; l'une, ACB (*fig.* 1023), fixée à la charponte

[1] *Ann. de ch. et de ph.*, 2e série, t. XXVI, p. 258, et 3e série, XLIII, 445; *Comptes-rendus de l'Acad. des sc.* de Paris, t. XXXIX, p. 1142.

du toit, est munie d'une embase *mn*, destinée à écarter l'eau de la pluie; l'autre, DE, s'emboîte exactement dans la première, par un tenon pyramidal *a*, retenu par une goupille.

Le fer étant sujet à se rouiller, la pointe est formée par une tige conique *vo* en cuivre jaune, de 33 centimètres de hauteur, fixée à la tige de fer au moyen d'une vis *v* maintenue par des goupilles. La pointe est dorée à son extrémité, ou mieux, comme l'a imaginé Beyer, terminée par une petite aiguille en platine *r*, de 5 centimètres de longueur; cette aiguille est unie en *o* à la tige de cuivre, par une soudure d'argent, et consolidée au moyen d'un petit manchon en cuivre, comme on le voit en R.

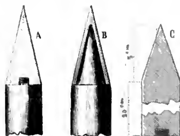


Fig. 1024.

Les pointes effilées sont sujettes à se fondre par les coups de foudre, ce qui ôte au paratonnerre la faculté de décharger les nuages. La commission de 1854 a recommandé des pointes à angle de 30°, A (*fig.* 1024). Le cône en platine, A, est vissé à l'extrémité de la tige de fer. MM. Deleuil ont diminué notablement le prix de ces pointes, en remplaçant le cône massif par une capsule de platine B, soudée, à la soudure forte, à un cône en fer qui la remplit exactement. La commission a aussi indiqué des pointes encore moins coûteuses en cuivre massif, vissées à l'extrémité de la tige de fer, comme on le voit en C; le cuivre est plus fusible que le platine; mais comme il conduit mieux, il est moins exposé à être fondu par la décharge électrique. On en peut dire autant de l'argent, qui peut aussi remplacer le platine.

II. Conducteur. — On fixe le conducteur au pied de la tige, soit en le serrant, au moyen d'un boulon, entre les oreilles du collier *c* (*fig.* 1023), soit en le boulonnant en *f* à la queue de l'étrier F. Il est soutenu sur le toit par des fourchettes fixées à la charpente; et le long des murs, par des crampons. On le recourbe pour lui faire suivre les contours du bâtiment. Mais il faut éviter les courbures trop brusques, car on a vu le fluide, arrivé à un angle trop prononcé, s'échapper du conducteur, comme par une sorte de vitesse acquise. Au lieu d'un seul conducteur, on en met souvent deux pour plus de sûreté, comme on le voit *fig.* 1022. Lorsqu'il y a plusieurs paratonnerres sur le même édifice, il faut au moins un conducteur pour deux tiges, et l'on fait communiquer tous les conducteurs entre eux.

On donne au conducteur un diamètre de 17 millimètres s'il est cylindrique, et une épaisseur de 15^{mm} s'il est carré. On n'a pas d'exemple que des barres de cette grosseur aient été fondues par les plus violents coups de foudre. Si le conducteur était en cuivre, métal qui conduit mieux que le fer, on pourrait se contenter de dimensions encore moindres. Le conducteur étant ordinairement

formé de plusieurs barres ajustées les unes à la suite des autres, il faut faire en sorte qu'il y ait contact intime aux points de jonction. La moindre séparation par de la poussière, ou de la rouille produisant une résistance, il pourrait y avoir fusion aux joints, et, par suite, interruption dans le conducteur. La commission de 1854 conseille de souder à l'étain, et sur des surfaces ayant au moins 10 centimètres carrés, les joints qui devront être ajustés sur place, et de les consolider par des vis, des boulons ou des manchons.

Dans les paratonnerres des magasins à poudre, les plus petites solutions de continuité sont à redouter, parce qu'il s'y produit des étincelles qui peuvent enflammer le poussier de charbon qui voltige dans l'air. Aussi a-t-on coutume, comme l'a proposé Toaldo, dès 1776, de placer les paratonnerres sur des mâts plantés à une certaine distance de l'édifice. Quand cela n'est pas possible, on place sur le bâtiment, des paratonnerres sans tiges, sur lesquels les nuages n'agissent que faiblement, de manière que leur conducteur n'est parcouru, en temps d'orage, que par un faible courant d'électricité.

Beyer a imaginé d'employer pour conducteurs, des câbles en fil de fer, avec lesquels on ne peut craindre les solutions de continuité. On les compose ordinairement de 4 torons formés eux-mêmes de 15 fils de fer tordus; les torons sont goudronnés séparément, puis le câble entier, pour les préserver de la rouille. Le câble doit avoir 16 à 18 millimètres de diamètre; on le soude au pied de la tige, et à la barre de fer qui entre en terre, en prenant une foule de précautions pour que le fluide puisse passer également par tous les fils; sans cela, quelques-uns pourraient être fondus, et le câble rompu. La commission de 1854 prescrit d'étamer les fils de fer à leur extrémité, et de les souder à l'étain sur une longueur de 10 centimètres, de manière à former comme un cylindre massif.

Les chaînes à anneaux doivent être rejetées, la communication d'un anneau à l'autre se faisant par une surface de contact trop étroite, où il peut y avoir fusion. C'est ce qui est arrivé, le 19 avril 1827, à la chaîne du paquebot le *New-York;* elle fut dispersée en fragments brûlants, sur presque toute sa longueur, et le pont fut couvert de globules de fer incandescents gros comme des balles de fusil, qui y mettaient le feu, malgré une couche de grêle et la pluie qui tombait à torrents.

III. Communication avec le sol. — La partie du paratonnerre qui demande le plus d'attention de la part du constructeur est celle qui s'enfonce dans la terre. Si l'on a un puits à sa disposition, on y fait descendre le conducteur, de manière qu'il plonge dans l'eau, de $\frac{1}{2}$ mètre au moins, quand le niveau est au plus bas (*e fig.* 1022), et on le termine par plusieurs branches, qui facilitent la diffusion du fluide. La barre de fer se rend du pied de l'édifice au puits, à travers un canal revêtu de briques ne se joignant pas exactement, et rempli de *charbon calciné*, qui préserve la barre de l'oxydation, et laisse passer facilement l'électricité dans le sol. On a vu des barres ainsi disposées, se conserver pendant plus de 30 ans.

Quand il n'y a pas de puits à proximité, on fore, avec une large sonde, un trou vertical, assez profond pour atteindre une couche aquifère. Dans l'axe du trou, on fixe l'extrémité de la barre terminée par plusieurs branches, et l'on remplit le trou avec du coke en très petits morceaux, ou du *charbon calciné*, par exemple de la *braise de boulanger* (*f, fig.* 1022). L'emploi du charbon a été indiqué par Patterson, en 1790. Le charbon ordinaire ne peut convenir, car il est mauvais conducteur (1262). On ne saurait trop insister sur ce point; des accidents, qui pouvaient avoir une immense gravité, ont eu lieu, parce qu'on avait employé du charbon ordinaire : par exemple, le tonnerre tomba, en 1829, sur le paratonnerre du magasin à poudre de Bayonne, et causa divers dégâts aux plombs de la toiture : le conducteur était entouré de charbon ordinaire.

La commission de 1854 conseille aussi d'adapter, au point où le conducteur pénètre dans le sol, une branche secondaire s'étendant dans la couche superficielle, laquelle devient conductrice pendant les pluies d'orage, et peut se trouver séparée des couches humides profondes, par des couches devenues mauvaises conductrices à la suite d'une longue sécheresse.

Quand on ne peut trouver de couche humide, comme, par exemple, lorsqu'on est sur le roc, il faut creuser une longue rigole avec de nombreuses ramifications, dans lesquelles on place le conducteur entouré de charbon calciné, afin de compenser, par l'étendue de la surface de contact, ce qui manque à la conductibilité du sol.

Un paratonnerre qui communique intimement avec le sol ne peut être dangereux ; mais cette condition est essentielle. Si elle n'est pas remplie convenablement, l'édifice est plus exposé qu'en l'absence de l'appareil, à cause de sa grande élévation et de sa nature métallique; et même, si la foudre ne le frappe pas, il s'y accumule une grande quantité d'électricité repoussée par celle du nuage, électricité qui peut se porter sur les corps voisins, avec une violente explosion, comme cela est arrivé à Richmann (1360).

On a vu la foudre causer de grands dégâts à des édifices armés d'un paratonnerre dont le conducteur se terminait dans une citerne étanche; le ciment et la maçonnerie empêchant la sortie de l'électricité.

1382. Paratonnerres sur les navires. — Les navires sont très exposés aux coups de foudre, puisqu'ils présentent une grande élévation au dessus de la mer. La prudence commande donc de les munir de paratonnerres. La tige, qui se réduit à la partie en cuivre de la *fig.* 1023, se place à l'extrémité du mât. Un cable en fil de fer part du pied de cette tige, passe dans un anneau fixé au porte-hauban, et se réunit à une barre de fer qui communique avec le doublage en cuivre du navire. Les gros navires sont armés de deux paratonnerres, un sur le grand mât, l'autre sur le mât de misaine.

M. Harris, qui s'est occupé tout particulièrement des paratonnerres des navires, forme le conducteur, d'une série de feuilles de cuivre appliquées sur le mât, et qu'il fait communiquer avec le doublage, par l'intermédiaire de

larges plaques métalliques circulant sur les flancs du navire, de manière à offrir à l'électricité un passage plus facile que par toute autre voie. Ces plaques se prêtent à toutes les positions de la mâture, et protégent le navire, même quand ses mâts sont endommagés ou brisés ; car elles sont tellement distribuées et unies entre elles que, quel que soit le point frappé par la foudre, l'électricité ne peut entrer dans un circuit dont ces conducteurs ne feraient pas partie. Ce systéme, adopté par la marine d'Angleterre, a reçu, en 1851, à l'Exposition de Londres, une récompense de premier ordre.

1383. De l'utilité des paratonnerres. — Dès l'invention des paratonnerres, en 1752, on en a contesté l'utilité ; on les a même accusés d'être dangereux et d'attirer la foudre. Cette opposition, bien concevable du reste, quand on considère qu'on s'attaque au plus redoutable des météores, et quand on compare la simplicité des moyens à la grandeur des effets que l'on veut conjurer, a cédé devant l'évidence des faits, et les paratonnerres ont fini par être adoptés dans tous les pays civilisés. C'est à Philadelphie qu'on les a d'abord appliqués ; et cette ville, où les accidents par la foudre étaient autrefois si fréquents, n'en a plus qu'un très petit nombre à enregistrer. D'Amérique, les *gardes-tonnerres* comme on disait alors, passèrent en Italie et en Allemagne ; Guiton de Morvau établit à Dijon, les premiers qu'on ait vus en France.

Aprés avoir reconnu que les paratonnerres préservent les édifices de la foudre, on voulut contester l'utilité des pointes. Les Anglais, le roi Georges à leur tête, en haine de Franklin, recommandaient de terminer les tiges des paratonnerres par des boules. Prétendre enlever aux nuages une quantité sensible d'électricité, c'était, disaient-ils, vouloir vider un lac au moyen d'un simple robinet. Remarquons qu'il ne s'agit pas de détruire toute l'électricité des nuages, mais d'en enlever seulement une quantité suffisante pour qu'une décharge sur la terre ne soit plus possible. Or, les quantités enlevées sont considérables, comme le prouvent les expériences de Romas (1360), et l'expérience suivante, citée par Arago : Beccaria, en 1753, dressa sur une église de Turin, une barre isolée portant une pointe mobile, qu'on pouvait tourner vers le ciel ou vers la terre, en tirant un cordon de soie. Cette pointe communiquait avec le sol, par un conducteur présentant une large solution de continuité. Par un temps d'orage, quand la pointe était tournée vers le ciel, des étincelles, tellement rapprochées qu'elles semblaient n'en former qu'une, remplissaient l'interruption ; et quand on laissait retomber la pointe vers la terre, il n'y avait plus d'étincelles, ou du moins elles étaient très rares.

Du reste, on a pu constater plus d'une fois que des orages poussés par le vent au-dessus d'édifices armés de paratonnerres à pointes, s'apaisaient presque aussitôt, ou du moins diminuaient notablement d'intensité.

Il résulte, de plus, d'une multitude d'observations, que, non seulement les paratonnerres à pointes préservent l'édifice quand la foudre le frappe, mais encore qu'ils empêchent le plus souvent l'explosion d'avoir lieu sur cet édifice. Voici quelques faits empruntés à la Notice d'Arago. Dans la Carinthie, une

église placée sur une éminence était si souvent foudroyée, qu'on avait fini par la fermer pendant l'été. Aprés qu'on l'eût armée d'une pointe, elle ne reçut, en 25 années, qu'un seul coup de foudre, qui ne produisit aucun dégât. Le palais Valentino à Turin, l'église Saint-Marc de Venise, la tour de Sienne, étaient souvent endommagés par la foudre, avant qu'on y eût établi des paratonnerres. Dans le port royal, à la Jamaïque, deux vaisseaux sont foudroyés au milieu d'un grand nombre d'autres; ils étaient seuls dépourvus de paratonnerres. On pourrait citer plusieurs observations du même genre. Le 21 mai 1831, le vaisseau la *Calédonia* était entouré, pour ainsi dire, de coups de foudre qui frappaient la mer et le rivage, dans la baie de Plymouth, et il ne fut pas atteint, grâce à son paratonnerre. On peut conclure de là que les paratonnerres à pointe sont rarement frappés de la foudre; ce qui, du reste, est d'accord avec ce que nous savons des propriétés des pointes.

Les paratonnerres à longues tiges terminées par des boules, ou dont la pointe a été détruite, ne sont pas dans le même cas : ils peuvent provoquer la foudre, à cause de leur grande élévation et de leur nature métallique; mais sans danger pour l'édifice, qu'ils préservent toujours efficacement, quand la communication avec le sol est bien établie.

Quand on considère les dégâts considérables qu'occasionne la foudre, les incendies qu'elle allume, et les accidents redoutables auxquels sont exposés les habitants des maisons foudroyées, on ne comprend pas comment tous les édifices élevés dans les villes, les maisons isolées, et particulièrement les églises de campagne, ne soient pas toujours armés de paratonnerres, surtout quand on compare la dépense à faire à celles qu'entraînent les réparations des dégâts produits si fréquemment dans ces derniers édifices. Il suffirait, en effet, le plus souvent, d'unir au sol par un conducteur, la croix qui surmonte le clocher. — Les maisons des paysans peuvent être préservées très économiquement, par une corde en paille partant du point le plus élevé du toit, et dont l'extrémité inférieure s'enfonce dans la terre[1].

Sur mer, les coups de foudre sont très fréquents, et les accidents bien plus à redouter, puisqu'ils peuvent entraîner la perte du navire avec tout ce qu'il contient. M. Harris, qui travaille depuis bien longtemps à propager les paratonnerres sur les vaisseaux, cite, dans un travail présenté au conseil de l'amirauté, plus de 200 cas de foudre ayant endommagé des vaisseaux de la marine anglaise. Il a constaté, entr'autres, qu'à une certaine époque, en temps de guerre, 40 vaisseaux de ligne, 20 frégates et 10 corvettes, ont été mis hors de service par 70 coups de foudre, parmi lesquels 10 ont mis le feu aux mâts, aux voiles ou à d'autres parties du navire. Il remarque encore que, sur 54 vaisseaux marchands foudroyés, 18 ont été complétement perdus.

Nous devons dire, en terminant, que les paratonnerres n'ont pas d'action sur le *tonnerre en boule* (1376), phénomène heureusement assez rare.

1 Cosmos, *Revue du progrès des sciences* t. XIV, p. 29.

III. Formation et répartition des orages. — Grêle. — Trombes.

1384. Formation des nuages orageux. — Le mode de formation des nuages orageux est assez obscur; il en est de même de leur constitution électrique. On peut cependant se rendre compte des phénomènes dans leur ensemble. Disons d'abord que les nuages orageux peuvent se former de deux manières : 1° par la rencontre de deux vents opposés; c'est ce qui a lieu surtout pour les rares orages de la saison froide; 2° par l'ascension d'une colonne d'air chaud et humide. Quel que soit le mode de formation des nuages orageux, on admet généralement qu'ils empruntent leur électricité à l'atmosphère, qui en renferme habituellement une certaine quantité, comme nous le verrons (1400), quantité d'autant plus grande que la couche considérée est plus élevée. Décrivons d'abord la formation d'un orage par une colonne d'air ascendante.

Ces sortes d'orages prennent naissance vers la fin des journées chaudes : l'air est d'abord calme, étouffant; on éprouve un malaise général, qui fait dire que le *temps est lourd*, et que l'on attribue à ce que l'humidité de l'air ralentit la transpiration. Aussi le thermomètre n'est-il pas aussi haut qu'on pourrait le croire d'après l'impression éprouvée. Cependant la température est très élevée, surtout près de la surface du sol, et le décroissement est très rapide quand on s'élève. En même temps, le baromètre baisse graduellement. Bientôt l'atmosphère perd sa transparence, le ciel devient d'un bleu très pâle, puis on aperçoit, à une grande hauteur, une tache sombre qui grandit rapidement et devient un cumulus très dense, d'un gris sombre, à contours arrondis et bien marqués [1]. M. Espy explique la formation de ce nuage par l'ascension d'une colonne d'air humide, autour de laquelle l'air est violemment agité, comme nous l'avons expliqué précédemment (II, 1152). Ce nuage contient toute l'électricité du volume de vapeur qui s'est condensé pour le former.

De ce nuage partent de longues ramifications qui s'étendent, envahissent le ciel et contribuent, en se réunissant les unes aux autres, à l'extension du nuage principal. Vu d'une montagne qui le domine, ce dernier présente à sa partie supérieure d'énormes proéminences, des espèces de colonnes verticales qui s'élèvent à une grande hauteur.

On remarque aussi, assez souvent, de petits nuages blancs isolés, qui se meuvent irrégulièrement en s'approchant du nuage principal, qui les attire évidemment, et finissent par s'y réunir. Ces petits nuages, remarqués par Virgile, ont été désignés par Beccaria sous le nom d'*ascitizi*, c'est-à-dire nuages subordonnés ou additionnels. Cet observateur en a vu souvent appa-

[1] M. d'Abadie a vu, en Éthiopie, des nuages à éclairs, assez peu denses pour laisser voir les étoiles (*Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XXXIV, p. 896).

raître au-dessous du nuage principal, formant comme des taches blanchâtres. Ces ascitizi sont très irréguliers, comme déchirés; ils présentent de longs bras, qui se replient vivement quand leurs extrémités viennent à se rapprocher. Au bout de quelque temps, des lueurs instantanées se montrent dans le nuage, des éclairs jaillissent entre sa surface et celle des nuages voisins, la pluie tombe à grosses gouttes, et l'orage est déclaré.

Quand les nuages se forment par la rencontre de deux vents opposés, les phénomènes, un peu plus compliqués, présentent des circonstances analogues, seulement alors il se forme ordinairement un plus grand nombre de nuages distincts. Cette existence de plusieurs nuages voisins, ordinairement en deux couches superposées (1361), a été remarqué par Franklin, Beccaria, de Saussure; elle est nécessaire à l'explication des éclairs (1262). Cependant Arago cite des coups de tonnerre isolés, partis d'un nuage unique; mais, dans les quatre cas cités, l'éclair est venu frapper le sol.

Dans certains pays, les orages qui éclatent dans les montagnes doivent leur origine à des lambeaux qui se détachent de gros nuages inférieurs, ou qui se forment dans les plaines; ces lambeaux montent rapidement, en ramassant, pour ainsi dire, l'électricité croissante des couches qu'ils traversent, vont se grouper sur une cime, et engendrent là un orage. Ce phénomène a été souvent observé par M. Peytier, dans les Pyrénées.

Il résulte de ce qui précède, que les orages doivent être circonscrits dans un espace peu étendu. C'est, en effet, ce qui a lieu; et ils parcourent, sous l'action du vent, des bandes de pays plus ou moins larges, et d'une longueur qui dépend de la durée du météore et de sa vitesse de translation.

Les nuages orageux se forment à des hauteurs très variables. M. Kaemtz en a vu, dans les Alpes, dépasser le sommet du Faulhorm, du Schwarzhorn, du Pilate et du Niésen, ce qui leur assigne une hauteur de 3300 mètres au moins. Les habitants de Chamounix assurent que les orages passent souvent par dessus le mont Blanc (4810 mètres). Du reste, les traces de vitrification que l'on rencontre sur ces hautes cimes (1368) montrent que des orages les ont dépassées. D'un autre côté, on a vu des nuages orageux à moins de 1000 mètres de hauteur; ce sont ceux-là qui lancent la foudre sur la terre.

1385. Constitution électrique des nuages orageux. — Voici comment Gay-Lussac conçoit l'électrisation des nuages orageux [1] : la vapeur électrisée que contient l'air se condense en gouttelettes, qui retiennent l'électricité que renfermait cette vapeur, en la resserrant dans le volume beaucoup moindre qu'elle occupe à l'état liquide. Ces particules fortement électrisées, sont entourées d'une petite atmosphère de fluide, qui penètre la couche d'air humide qui les sépare les unes des autres. Si la tension de cette électricité n'est pas trop grande, les choses restent en cet état, et l'on a un nuage ordinaire; mais si la tension est forte, l'électricité passe d'une particule à l'autre,

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. VIII, p. 158.

pour se rendre à la surface du nuage, soit avec lenteur, à cause de l'imparfaite conductibilité de l'air humide, soit par des décharges simultanées entre ces particules, analogues à celles qui se produisent dans les carreaux magiques, et en donnant lieu à des éclairs de 2e classe (1362). Ces déplacements d'électricité à travers une masse discontinue, non homogène et dont les parties sont mobiles, ne peuvent avoir lieu sans des changements relatifs de position dans ces parties, ce qui contribue à produire ces mouvements intestins, cette espèce de fermentation que l'on remarque dans les nuages orageux, avant que l'orage n'éclate.

Quand l'électricité s'est portée à la surface du nuage, elle y présente une énorme tension, d'autant plus grande que le volume de ce nuage est plus considérable ; car la surface est proportionnelle au carré des dimensions linéaires, tandis que le volume, ou l'espace occupé d'abord par l'électricité, est proportionnel au cube de ces dimensions. Dès que la tension est devenue suffisante à la surface, les éclairs jaillissent entre les nuages voisins.

Les particules aqueuses, ne laissant passer l'électricité qui doit se rendre à la surface, qu'avec une certaine lenteur, cette surface reprend bientôt la tension perdue dans les premières décharges ; de là de nouveaux éclairs, jusqu'à ce que presque toute l'électricité du nuage ait été anéantie.

1386. — Des voyageurs ont pu séjourner impunément au milieu de nuages orageux sans éprouver d'accidents. Le météorologiste Richard, qui a traversé un semblable nuage, sur la petite montagne de Boyer, entre Châlons-sur-Saône et Tournus, entendit un bruit comparable à celui que ferait un tas de noix remuées sur un plancher. — MM. Peytier et Hossard, dans les Pyrénées, ont été plusieurs fois enveloppés dans des foyers d'orages tellement formidables, vus de la plaine, qu'on les croyait perdus. Plusieurs fois leurs cheveux, les glands de leur casquette, se dressèrent et répandirent une vive lumière accompagnée d'un sifflement prononcé. Leur tente, formée d'un triple coutil serré, paraissait comme embrasée. — Letestu, en 1786, resta dans son aérostat, pendant trois heures de la nuit, au milieu d'un orage ; il entendait un bruit étourdissant, sa nacelle s'emplissait de neige et de grêle, les dorures de son drapeau étaient scintillantes.

On conçoit que, dans une pareille situation, l'observateur, électrisé comme le milieu qui l'environne, soit à l'abri des décharges électriques ; de même qu'un corps introduit dans une sphère électrisée ne peut pas en tirer d'étincelles (1296). Cependant le danger n'est pas entièrement nul, car un nuage constituant un conducteur très imparfait, dans lequel l'électricité est inégalement distribuée, des décharges peuvent avoir lieu d'un point à un autre. C'est ainsi que Letestu trouva son drapeau percé ; et que MM. Peytier et Hossard reconnurent des traces de fusion au canon d'un fusil laissé hors de leur tente, et une autre fois, des traces de carbonisation sur un piquet en bois planté en terre. M. Buchwalder, se trouvant sur le mont Sentis, dans les Alpes, fut enveloppé par un violent orage, et son aide fut tué par un globe fulminant,

dans la tente où ils s'étaient réfugiés ; quant à lui, il éprouva une commotion violente suivie de la paralysie d'une jambe.

1387. Froid produit dans les nuages orageux. — Il est une particularité importante, signalée par M. Tessan [1], qui jette un nouveau jour sur l'état des nuages orageux : la surface d'un nuage orageux n'étant pas rigide, comme celle d'un corps solide, et l'effort exercé sur l'air par la tension électrique, contrebalançant une partie de la pression atmosphérique, cette surface devra s'étendre ; de plus, les particules électrisées se repoussant, le nuage se dilatera énormément pendant que l'électricité se portera à sa surface : ce qui explique cet accroissement, cette espèce de gonflement que l'on remarque dans les nuages orageux qui se forment. Cette dilatation sera accompagnée d'un grand refroidissement. Alors, de nouvelles vapeurs se condenseront, et les gouttelettes s'accroîtront rapidement ; ce qui, indépendamment de l'énorme hauteur de certains nuages orageux, peut servir à rendre compte de la grosseur et de l'abondance des gouttes de pluie qu'ils fournissent. Quand un éclair vif décharge subitement une partie de la surface du nuage, l'air la refoule et la comprime aussitôt, puisque la force électrique qui la tenait gonflée est subitement diminuée, et il y a une brusque condensation de nouvelles vapeurs par cette compression ; ce qui explique la recrudescence de la pluie après chaque violent coup de tonnerre. Nous verrons, en parlant de la grêle (1395), une autre cause qui explique cette recrudescence subite, et la grosseur des gouttes de pluies d'orage.

1388. Périodicité des orages. — Volta a remarqué que lorsqu'un orage éclate dans un lieu, souvent d'autres orages s'y produisent périodiquement pendant plusieurs jours de suite, et vers la même heure [2]. Ce fait a été fréquemment vérifié depuis ; il atteste que l'air de cette région a été constitué par l'orage primitif dans un état particulier favorable à la formation des nuages orageux. Volta attribue ce phénomène à trois causes : 1° l'air, après l'orage, est plus électrisé qu'auparavant ; l'observation directe l'a constaté bien des fois ; 2° l'espace où régnait l'orage primitif a été refroidi par les causes que nous avons indiquées (1387). Volta avait déduit l'existence de ce refroidissement, de l'observation d'un vent très froid et très sec, soufflant d'en haut, le lendemain des orages, surtout de ceux qui donnent de la grêle. Les vapeurs ascendantes doivent donc facilement se condenser dans les régions qu'occupait l'orage primitif ; 3° en outre les rayons solaires échauffant un sol mouillé par la pluie, produisent d'abondantes vapeurs qui se condensent dans les hautes régions de l'air. Un nouvel orage naîtra donc chaque jour, jusqu'à ce que cette disposition locale de l'atmosphère soit détruite par un vent assez fort pour renouveler l'air. Cette explication ne peut convenir aux orages engendrés par la rencontre de deux vents opposés ; aussi, M. Kaemtz fait-il remarquer que la

[1] *Comptes-rendus des séances de l'Académie des sciences* de Paris, t. XII, p. 791.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. IV, p. 245.

périodicité ne se remarque pas pour ces derniers comme pour ceux qui sont produits par une colonne ascendante d'air chaud et humide.

1389. De l'origine de l'électricité des nuages. — On admet généralement que l'électricité des nuages orageux est empruntée à l'atmosphère; de sorte que la quantité d'électricité que contient l'air serait la cause de l'orage. Plusieurs météorologistes pensent que cette quantité ne suffit pas pour rendre compte de l'énorme accumulation de fluide qui se fait dans les nuages, et ils ont supposé que ce fluide était produit au moment même de leur formation; de sorte que, dans cette hypothèse, l'électricité ne serait pas la cause de la production d'un orage, mais seulement la conséquence d'une condensation très grande et très rapide de vapeur. Volta, Bennet et plusieurs autres, ont admis que la vapeur, en se condensant, mettait en liberté de l'électricité latente qu'elle aurait absorbée en se formant; mais comme les deux fluides prennent naissance en même temps, on conçoit que leur destruction aurait lieu immédiatement. Ne pourrait-on pas attribuer plutôt l'électricité des nuages au frottement des deux masses d'air *de température différente* qui se rencontrent pour les former? Des deux électricités dégagées, l'une, la positive, se porterait sur l'air le plus froid, et l'autre sur l'air le plus chaud; car nous avons vu que la chaleur donne aux corps une tendance à prendre le fluide négatif (1264). Ces masses d'air mêlées de vapeur condensée seraient ainsi, les unes électrisées positivement, les autres négativement; les mouvements tumultueux qui résultent du conflit des deux vents contraires sépareraient ces masses, et nous aurions ainsi, dans la même région de l'atmosphère, des nuages positifs et des nuages négatifs, ou bien un même nuage dont certaines parties seraient électrisées positivement, et d'autres négativement. De là des décharges, soit d'un nuage à l'autre, sous forme d'éclairs de première classe, soit dans un même nuage, sous forme d'éclairs de deuxième classe.

Quand l'orage est dû à une colonne d'air ascendante, le frottement de cette colonne contre l'air environnant, dont elle entraîne une partie avec elle, fournirait l'électricité du nuage qui se forme, et cette électricité serait encore positive dans les parties les plus froides du nuage, et négative dans les parties les plus chaudes.

Tonnerres des nuages engendrés par les volcans. — Les volcans nous présentent une image de ce qui se passe dans ce dernier cas : la colonne de cendres, sèches ou mêlées de vapeur d'eau, qu'ils lancent, s'épanouit à une certaine hauteur, en formant un nuage épais, dont il part souvent des éclairs et des coups de foudre, qui frappent de terreur les habitants des contrées voisines, et ajoutent aux dangers auxquels ils sont exposés. L'électricité est produite ici en partie par la même cause qui la produit à la sortie de l'air d'un fusil à vent (1261); mais le frottement de la colonne brûlante contre l'air environnant doit y contribuer en partie. Peut-être aussi cette colonne est-elle électrisée d'avance par les réactions chimiques qui se font dans l'intérieur de la bouche même du volcan.

1390. Répartition des orages suivant les saisons. — Dans les latitudes où les saisons sont bien caractérisées, on peut dire, en général, que les orages sont le plus fréquents dans la saison des chaleurs ; par conséquent, en *juillet* et *juin*, dans notre hémisphère. Il y a cependant des pays où le maximum se présente en *mai*, *août* ou *septembre*. Dans l'hémisphère austral, le maximum tombe en *janvier*, *février* ou *mars*, qui sont les mois les plus chauds.

Le tableau qui suit donne le nombre moyen d'orages par an et par mois, dans un certain nombre de localités, disposées dans l'ordre des latitudes. Les résultats qu'il contient ont été rassemblés par Arago [1].

NOMS DES LIEUX.	LATITUDE.	NOMBRE D'ORAGES.												
		Janvier.	Février	Mars	Avril.	Mai.	Juin	Juillet.	Août.	Septembre.	Octobre.	Novembre.	Décembre.	Moyenne annuelle.
Abyssinie.	13° N	0	0	4	4	6	7	3	6	4	4	0	0	38
Calcutta.	22	0	4	6	5	7	8	6	10	9	5	0	0	60
Le Caire.	30	0,1	0	0,5	1	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5	3.5
Smyrne.	38	2	4	4	1	1	0	0	0	3	0	1	3	19
Maryland . . .	39	0	0	5	1	10	8	11	5	0	1	0	0	41
Pékin.	40	0	0	0	0,2	0.5	2	1,7	1	0,3	0,1	0	0	5,8
Québec.	46	0	0	0	0.6	2,5	5,5	8	5	1	0,5	0,1	0.1	23
Paris.	48	0,1	0,1	0,3	0,8	2,7	2,9	2.6	2,1	1,3	0,5	0,1	0,1	14
Londres.	51	0	0,2	0,4	0,4	1.8	1,4	2	1,3	0,4	0,4	0,2	0,1	8.5
Leyde.	52	0,1	0,4	0,2	0,3	2,1	2,7	2,9	2,0	1	0,3	0,3	0,2	13
Pétersbourg.	60	0	0	0	0,7	2.7	2,1	2,5	0,9	0,1	0	0,1	0	9,2
Rio-Janeiro.	23° S	10,2	9,3	4	1,7	0,8	0,7	1,3	1,1	2,8	3,7	6	0	50
Buénos-Ayres. . .	34	1,9	2,6	2,1	1,8	1,7	1,1	1,3	1	2,0	2,3	1,8	2	22

En représentant par 100 le nombre d'orages par an, et les distribuant dans les différentes saisons, M. Kaemtz a formé le tableau suivant, pour différentes régions de l'Europe.

	NOMBRE D'ORAGES SUR 100 PAR AN.			
	Hiver.	Printemps.	Été.	Automne.
Europe occidentale.	8,9	17,7	52,5	20,9
Suisse.	0,4	20,6	69,0	10,0
Allemagne.	1,4	24,4	66,0	8,2
Intérieur de l'Europe.	0,0	15,7	79,3	5,0

[1] *Annuaire du Bureau des longitudes*, pour 1838, p. 405 à 416

La *fig.* 1025 montre, d'un coup d'œil, les résultats consignés dans ce tableau. Les verticales sont proportionnelles aux nombres annuels d'orages; les saisons sont désignées par les initiales de leur nom. La courbe *eo* correspond à l'Europe occidentale, *ss* à la Suisse, *aa* à l'Allemagne, et *Ei* à l'intérieur de l'Europe.

A l'inspection des tableaux qui précédent, on reconnaît facilement l'influence des saisons. On voit qu'il y a très peu d'orages en hiver. En Europe, on commence à en observer quelques-uns au mois de mars à Rome, à Padoue et à La Rochelle; en avril, ils pénétrent dans le centre de l'Allemagne; en mai, ils s'étendent vers Stockholm et Pétersbourg. Ils disparaissent en août dans cette dernière ville; vers septembre, au centre de l'Allemagne; en octobre, sur les côtes occidentales; en décembre, à Padoue et en Italie.

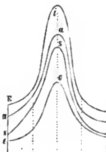


Fig. 1025.

Si les orages sont trés rares en hiver, il semble qu'ils sont alors plus dangereux qu'en été, c'est-à-dire qu'ils donnent plus de coups de foudre. En effet, Arago, ayant classé par mois, les coups de foudre dont il a pu avoir connaissance, et qui ont atteint des navires à différentes époques, en a trouvé le plus grand nombre en *janvier*, *février*, *avril*, *novembre* et *décembre*, et comme les orages sont bien plus rares dans ces divers mois que dans les autres, on voit que le tonnerre tombe plus souvent, au moins sur mer, pendant les orages d'hiver que pendant ceux d'été; ce qui justifie le proverbe des campagnards, que le tonnerre n'est jamais plus dangereux que lorsqu'il fait froid. On peut se rendre compte de ce résultat, en remarquant que les nuages sont généralement beaucoup plus bas l'hiver que l'été.

1391. Fréquence des orages en différents lieux. — On peut dire, en général, que le nombre des orages diminue à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur. Au 70e degré de latitude nord, il tonne à peine une fois par an; il en est ainsi en Islande. Il ne paraît pas qu'on ait observé d'orage au-delà du 75e degré.

C'est surtout entre les tropiques que les orages sont fréquents. D'après M. Boussingault, il y a tous les jours, et peut-être à tous les instants, un ou plusieurs points de la zone torride occupés par des orages; et ces orages sont d'une violence inconnue dans nos climats. Ils n'éclatent pas également partout; ils se forment principalement au commencement et à la fin de la saison des pluies; quand le soleil se trouve au zénith du lieu; quand les vents alizés changent, et particuliérement sur leur limite. Ainsi, à Madère, les orages sont fréquents en hiver, au moment où la limite de l'alizé du *nord-est* passe près de cette île. Mongo-Park a remarqué que les orages sont fréquents en Afrique, au moment où les vents du *sud-est* succédent à ceux du *nord-est*, et réciproquement. Entre les tropiques, les orages ont surtout pour théâtre ces régions

calmes où il ne règne pas de vent constant (II,1147). Ils sont produits par des colonnes d'air ascendantes sous forme de *tornados*, n'occupent qu'un espace peu étendu, commencent subitement, et durent peu, rarement plus d'une demi-heure. M. Kaemtz cite un de ces ouragans, qui ravagea, en octobre 1831, le fond du golfe de Bengale, aux environs de Balasore; il occasionna la mort de 10,000 personnes; la mer, poussée par un vent furieux, vint balayer la route de Calcutta, éloignée de 14 kilomètres de la côte, et y transporta les débris d'un navire.

Dans les régions de la zone torride où règnent les vents alizés, les orages sont aussi rares que les pluies elles-mêmes. Le Bas-Pérou, en particulier, où il ne pleut jamais (II,1184), est complètement exempt d'orages, et les habitants qui n'ont pas voyagé n'ont aucune idée du tonnerre.

Répartition des orages en Europe. — M. Berghaus a dressé une carte indiquant, pour les différentes parties de l'Europe, le nombre moyen annuel des orages. On y voit que sur les côtes occidentales, ce nombre diminue assez régulièrement quand la latitude augmente. Dans l'Europe centrale, le maximum se présente dans la vallée du Danube et à Sagan, dans la Silésie, à l'entrée de la vallée de l'Oder; c'est aussi la partie la plus pluvieuse (à Bude, il y a 28 orages par année, et à Sagan, 29). Mais c'est surtout vers le sud-ouest de l'Europe, que les orages sont fréquents; en Italie, entre Milan et Naples, sur la mer Adriatique et ses côtes orientales jusqu'en Albanie, il y a de 40 à 45 orages par an; c'est à peu près le double de la plupart des autres points de l'Europe. D'après M. de Pouqueville, il y en a 42 à Padoue et à Rome, et 45 à Janina. Cette fréquence des tonnerres en Italie explique l'étude spéciale qu'en faisaient les Etrusques, et l'importance superstitieuse qu'y attachaient les Romains. En Grèce, les orages sont aussi très nombreux; il y en a, à peu près, 40 par an. D'après Lucrèce, ils sont le plus fréquents au printemps et en automne, résultat confirmé par les observations de M. Peytier. Dans la Sicile, où se font sentir les vents d'Afrique, et où il pleut rarement, on ne voit qu'un petit nombre d'orages : à Palerme, M. de Pouqueville n'en trouve que 13,5 par an, la plupart en automne.

Orages en France. — On doit à M. C. Martins un travail important sur la distribution des orages en France. Si l'on tire une ligne à peu près droite, allant du sud-ouest au nord-est, par La Rochelle, Orléans et Châlons-sur-Marne, on trouve, au nord de cette ligne, de 12 à 20 orages par an en moyenne, le nombre augmentant quand on descend vers le sud. Au midi de cette ligne et à l'ouest des Cévennes, le nombre d'orages augmente encore quand on marche vers le sud, mais on n'en compte plus que de 10 à 12.

Influences locales. — Dans ce qui précède, il est facile de reconnaître l'intervention de causes locales; c'est ainsi que nous rencontrons le plus d'orages dans le nord-ouest de la France, au centre de l'Allemagne et en Italie. Il tonne plus souvent sur les continents qu'en pleine mer, où les circonstances favorables à la formation des nuages sont moins nombreuses (II,1175).

En Amérique, il y a, à égalité de latitude, plus d'orages qu'en Europe. A la Jamaïque, il tonne tous les jours pendant 5 mois consécutifs. A Popayan, dans la Colombie, il en est de même pendant toute une saison, M. Boussingault y a compté 20 jours orageux dans un seul mois. Les montagnes qui jouent un si grand rôle dans la formation des nuages, apportent aussi leur influence dans la distribution des orages : en Europe, il tonne plus souvent sur les versants occidentaux que dans la plaine. A Bergen, à l'ouest des Alpes scandinaves, les orages sont, comme les pluies, plus fréquents en hiver qu'en été; c'est le contraire dans l'intérieur du pays. Les montagnes détournent aussi les orages de leur route; souvent elles les partagent en deux autres qui sont emportés par le vent dans des directions différentes, avec des vitesses qui peuvent aller, d'aprés Canton, à prés de 10 lieues à l'heure.

Indépendamment de la configuration du sol, il est d'autres influences qui paraissent devoir être attribuées à la nature des matériaux qui le composent, ou à la présence de forêts, de nappes d'eau, etc. Ainsi, tandis qu'à Paris il ne tonne que 14 fois par an, à Denainvillers, entre Pithiviers et Orléans, il tonne jusqu'à 21 fois, et cependant le pays, autour de Paris et d'Orléans, est aussi uniforme que possible. D'aprés un relevé fait en 1803 par M. Dillwyn, il semble que, en Angleterre, les pays de mines métalliques présentent annuellement moins d'orages que les autres. Cette influence de la nature du sol est, du reste, appuyée sur un trop petit nombre d'observations pour que nous nous y arrêtions davantage.

1392. DE LA GRÊLE. — La grêle vient des nuages orageux. Elle tombe au commencement de l'orage, souvent pendant l'orage, et jamais après. Les nuages à grêle sont trés épais et obscurcissent notablement l'atmosphére; leurs contours sont comme déchirés. Ces nuages sont ordinairement produits par la rencontre de vents du sud et du nord; et la grêle paraît se former dans les points où le choc est le plus violent. On a remarqué, en effet, que la grêle tombe dans un espace beaucoup moins étendu que l'orage lui-même, et qu'elle ne dure, en un même lieu, que peu de temps, un quart d'heure au plus. Enfin, l'orage s'éteint peu aprés que le nuage a cessé de répandre des grêlons.

Immédiatement avant que la grêle ne tombe, on entend souvent dans les nuages un bruit particulier, que l'on a comparé à celui que produit un tas de noix que l'on remue. Peltier cite une grêle tombée à Ham, qui fut précédée d'un bruit tellement intense, qu'il crut d'abord qu'il était produit par un escadron de cavalerie. Ce bruit, mentionné par Aristote et par Lucréce, est généralement attribué à la rencontre des grêlons qui s'entrechoquent avant de tomber. On a remarqué que, quelquefois, les grêlons n'ont pas, en arrivant à terre, la vitesse que comporte la hauteur d'où ils partent; ils tombent mollement, et il semble qu'ils éprouvent une résistance particulière, bien plus grande que celle dont l'air est susceptible.

Quelque temps aprés l'orage à grêle, on observe un refroidissement de l'atmosphére d'autant plus sensible qu'il contraste avec la chaleur étouffante

qui, le plus souvent, l'a précédé. Nous avons indiqué la cause de ce froid (1387), à laquelle le vent du nord peut ajouter son effet.

Grosseur, forme, structure des grêlons. — Le volume des grêlons est très variable, depuis quelques millimètres de diamètre jusqu'à 10 centimètres et plus. Dès qu'ils atteignent la grosseur d'une noix, ils anéantissent les récoltes; plus gros, ils brisent les branches des arbres, enfoncent les toits, tuent les animaux. M. Delcros cite une grêle tombée à Angers, le 4 juillet 1819, et qui enfonça des toitures; les grêlons étaient animés d'une telle vitesse, qu'ils perçaient des ardoises, comme l'auraient fait des biscayens. La *fig.* 1027 montre la coupe d'un de ces grêlons, dessinée à moitié grandeur naturelle; il y en avait qui présentaient un diamètre de 12 centimètres. On a vu trop souvent des grêlons acquérir la grosseur d'un œuf de poule. M. Boisgiraud a décrit des grêlons de cette grosseur, tombés en grande quantité à Toulouse, dans la matinée du 8 juillet 1834.

En 1831, il tomba à Constantinople des grêlons gros comme le poing; une demi-heure après, ils pesaient encore 500 grammes. Le 15 juin 1829, une grêle enfonça les toits de Cazorta, en Espagne; les grêlons pesaient, dit-on, 2 kilogrammes!

Muschenbroeck cite des masses de glace tombées du ciel, et formées de plusieurs grêlons soudés les uns aux autres; il est probable que les énormes grêlons dont nous venons de parler étaient des agglomérations semblables. On doit recommander aux observateurs, de bien décrire les grêlons de grosseur exceptionnelle, et d'indiquer s'ils les ont vu tomber, ou s'ils les ont simplement ramassés au milieu d'un amas de grêle tombée depuis quelque temps. Dans ce dernier cas, il pourrait se faire que plusieurs grêlons se fussent soudés après leur chute, car il y en a qui sont en voie de fusion avant d'arriver à terre, et d'autres qui sont à une température inférieure à 0°. M. Pouillet en a rencontré dont la température était de — 3°, et même — 4°. C'est par une agglomération semblable qu'on pourrait expliquer la formation d'un énorme bloc de glace de 1m de long et de 7 décimètres d'épaisseur, que l'on dit être tombé en Hongrie, le 8 mai 1802. On prétend qu'on en a trouvé un de dimensions analogues près de Seringapatnam, vers la fin du règne de Tippoo-Saïb.



Fig. 1026.

Forme. — Les grêlons sont ordinairement de forme sphéroïdale, mais on en voit aussi d'ovales, d'aplatis, d'irréguliers. Leur surface est couverte d'éminences plus ou moins prononcées (*fig.* 1026 et 1027). M. Lecoq en a vu de forme ovale, sur les deux bouts desquels étaient implantées des aiguilles cristallines de glace. On rencontre assez souvent des grêlons ayant la forme de pyramides dont les angles sont émoussés par un commencement de fusion, et dont la base est remplacée par une portion de surface sphérique irrégulière c (*fig.* 1026), qui semble avoir

son centre au sommet; ce qui fait considérer ces grêlons comme des fragments de masses sphéroïdales qui se sont partagées en secteurs.

Structure. — Il ne faut pas confondre avec la grêle, le simple grésil (II, 1178) ou bien ces globules de glace qui tombent quelquefois pendant l'hiver et ne sont que des gouttes de pluie congelées pendant leur chute. Les véritables grêlons sont produits pendant les orages; ils ont séjourné pendant quelque temps dans les nuages, et ils sont formés de plusieurs couches. Quand leur forme est sphéroïdale, ils présentent constamment au centre un noyau blanc opaque, semblable à un grain de grésil, autour duquel on distingue une ou plusieurs couches concentriques, comme en *a*, *b*, *d* (*fig.* 1026). Les couches sont souvent alternativement opaques et transparentes; souvent aussi on observe des stries rayonnantes partant du noyau opaque, comme en *b*. La *fig.* 1027 représente aussi cette structure rayonnée : autour d'une masse à peu près sphérique *ac*, se trouve une couche très irrégulière couverte d'éminences plus ou moins saillantes, et formée de glace transparente. La structure rayonnée explique la rupture de certains grêlons en secteurs sphériques présentant des couches parallèles à leur base (*c*, *fig.* 1026); ce qui atteste leur origine. Cette rupture est due, soit au choc des grêlons entre eux, soit au changement brusque de température qu'ils éprouvent en pénétrant, étant très froids, dans les couches inférieures, beaucoup plus chaudes, de l'atmosphère.

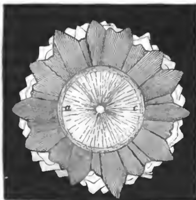


Fig. 1027.

On remarque parfois, dans les grêlons, des bulles d'air allongées dans le sens des rayons. M. Boisgiraud a fait une remarque très importante sur ceux qu'il a si bien décrits et que nous avons cités plus haut : il y avait dans la couche extérieure transparente de quelques-uns d'entre eux, de petits grains de glace opaque, semblables au noyau central, et qui purent être séparés de la masse dont ils paraissaient être indépendants. Enfin, on a trouvé dans certains grêlons des débris de paille, diverses poussières, par exemple de la cendre volcanique, dans le voisinage des volcans. M. Espy cite un orage tombé en juin 1808 vers l'est de l'état de Tennessee, dans lequel la grêle était mêlée de débris de feuilles vertes et de branches, recouverts d'une couche épaisse de glace, et formant ainsi des noyaux de grêlons.

1393. Répartition des averses de grêle. — On a peu de notions certaines sur la répartition des averses de grêle, à cause de la confusion faite généralement par les observateurs, entre le grésil et la vraie grêle.

Muschenbroeck n'était pas tombé dans cette faute; il distinguait la grêle non accompagnée d'orage (grésil) de celle qu'accompagne le tonnerre. Quand on ne fait pas cette distinction, on trouve que la grêle est d'autant plus rare en Europe, qu'on s'éloigne plus de la mer, et qu'elle tombe surtout au printemps. Mais la vraie grêle est propre, comme les orages, aux saisons chaudes ; c'est alors qu'elle présente de gros grêlons, et on peut dire qu'ils sont en général d'autant plus gros que la température est plus élevée.

La grêle peut se montrer à toute heure. En *été*, elle tombe, le plus souvent, au moment le plus chaud de la journée. En *hiver*, au *printemps* et en *automne*, on l'observe surtout à 9 heures du soir et à 7 heures du matin ; mais cette grêle est le plus souvent du grésil. De minuit à 4 heures du matin on n'en voit que très rarement, en toute saison. Ces résultats, recueillis par M. Kaemtz, sont relatifs à l'Allemagne et à la Suisse.

Influence des lieux. — La petite grêle, ou grésil, est fréquente dans le nord, mais les grêlons proprement dits tombent surtout dans les régions tempérées. Entre les tropiques, il grêle rarement au niveau de la mer ; quand cela a lieu, les grêlons sont en général très gros. Une grêle qui tomba à la Martinique, en 1721, passa pour un prodige. Il résulte cependant, d'un bon travail de M. A. Poey, que la grêle n'est pas trés rare dans les Antilles, et que c'est faute d'observations qu'on a avancé le contraire. Ainsi il trouve, à Cuba, 49 cas de grêle en 70 ans, de 1784 à 1854[1]. A Cumana, il ne grêle presque jamais : quand le niveau s'élève à 500 ou 600 métres, la grêle devient moins rare. A Mexico il tomba, le 17 août 1830, une si grande quantité de grêle, qu'elle formait dans les rues une couche de 35 à 40 centimétres. — Il tombe souvent de la grêle sur les montagnes. Saussure en a observé 11 fois pendant un séjour de 13 jours sur le Col du géant. M. Peytier a été souvent gêné dans ses travaux géodésiques des Pyrénées, par des averses de grêle. Quelquefois, au même moment, les vallées ne recevaient que de la pluie. Il est probable que, dans beaucoup de cas, il ne s'agit encore que de grésil.

Ici, comme pour les orages, on remarque l'influence de la configuration du sol. Il y a des localités annuellement ravagées par la grêle : telles sont certaines parties de l'Auvergne, aux environs de Clermont ; tandis qu'entre le Puy-de-Dôme et le mont Dore, on en voit à peine une fois en 20 ans. D'après Scheuchzer, les vallées de la Suisse dirigées de l'est à l'ouest, comme celles du Valais et de Glarus, jouissent de la même immunité.

Marche des nuages à grêle. — Muschenbroeck avait déjà remarqué que la grêle se forme dans un foyer très circonscrit, qui s'avance progressivement, de manière à étendre ses ravages sur un espace étroit plus ou moins allongé. L'orage formidable du 13 août 1818, qui a été si bien décrit par Tessier[2], commença le matin dans le midi de la France, et se propagea dans la direction

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XLIV, p. 226.

[2] *Mémoires de l'Académie des sciences* de Paris pour 1790, p. 263.

moyenne du *sud-ouest* au *nord-est*. Les lieux ravagés par la grêle formaient deux bandes généralement parallèles à cette direction. Le milieu de la bande occidentale formait une ligne droite allant de Gand au confluent de l'Indre avec la Loire ; et celui de la bande orientale, une ligne menée de Malines à Amboise. La bande occidentale avait 700 kilomètres de long et 16 de largeur moyenne, et l'autre 800 kilomètres de longueur et 8 de largeur. 1039 paroisses de France furent ravagées dans l'espace de quelques heures ; les dégâts furent évalués à 24 ou 25 millions. Les deux bandes étaient séparées par un espace d'une largeur moyenne de 21 kilomètres, qui ne reçut que de la pluie. Il plut beaucoup aussi à l'est et à l'ouest des deux bandes. La grêle ne tomba, en chaque lieu, que pendant 10 minutes au plus, mais si abondamment et les grêlons étaient si gros (ils pesaient jusqu'à 250 grammes), que toutes les récoltes furent dévastées. En comparant les heures du phénomène en différents pays, on reconnut que l'orage avait marché avec une vitesse de 64 à 65 kilomètres par heure, et l'on put constater ses effets à travers la Hollande, et jusque dans la mer Baltique.

M. Lecoq a fait une enquête semblable à celle de Tessier, sur une grêle qui ravagea une partie de la France, le 28 juillet 1835[1]. L'orage prit naissance sur l'Océan, vers les 10 heures du matin ; la grêle tomba d'abord sur l'île d'Oleron, d'où le météore s'avança de l'*ouest* à l'*est* ; à midi, il traversait le département de la Creuse ; vers une heure, il entrait dans celui où s'élève le Puy-de-Dôme, doublait cette montagne, et venait s'éteindre sur Clermont, après avoir parcouru 360 kilomètres environ, en 4 heures 30^{m}. Les grêlons allèrent toujours en grossissant ; gros comme des noisettes dans la Charente-Inférieure, ils présentèrent, près d'Aubusson et de Clermont, la grosseur et la forme d'œufs de poule et d'œufs de dinde. Le nuage n'était pas très élevé, car le sommet du Puy-de-Dôme ne reçut pas de grêle, tandis que le petit Puy-de-Dôme en fut couvert.

1394. De la théorie de la grêle. — Il y a deux points à expliquer dans la grêle : la congélation des grêlons, et leur séjour plus ou moins prolongé dans l'atmosphère, pendant lequel ils s'accroissent avant de tomber. Sans remonter jusqu'à certains philosophes de l'antiquité, qui considéraient les nuages à grêle comme des masses de glace qui se brisaient en petits morceaux, nous citerons Muschenbroeck et l'abbé Mongez comme ayant les premiers tenté d'expliquer la grêle. L'un expliquait la grosseur des grêlons par des agglomérations de très petites masses de glace, et l'autre supposait qu'ils s'accroissaient pendant leur chute. Mais, avant Volta, aucun physicien n'avait tenu compte des principales circonstances du phénomène.

Explication de Volta. — Volta[2] attribue le froid qui détermine la congélation de l'eau des nuages, à l'évaporation, accélérée par l'électricité, par l'état de sécheresse de l'air des hautes régions, et surtout par l'action du soleil ; ce

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. II, p. 324.
[2] *Journal de physique*, t. LXIX, p. 286 et 333,

qui explique, suivant lui, pourquoi la grêle se montre principalement en été et aux heures les plus chaudes de la journée. Les petites particules de glace formées ainsi à la surface supérieure du nuage, sont soulevées par répulsion électrique, et retombent après avoir perdu leur électricité, pour être soulevées de nouveau. S'il y a deux couches de nuages, électrisées d'une manière opposée, les parcelles de glace oscillent entre ces deux couches, comme les balles de sureau de l'*appareil à grêle* (1271), et ils grossissent en condensant de nouvelles vapeurs, qui forment les couches successives dont ils sont composés. Cependant les nuages se déchargent par l'échange de fluide auquel les grêlons servent d'intermédiaire, et bientôt ceux-ci, trop gros pour que les forces électriques puissent lutter avec la pesanteur, se précipitent à la surface de la terre. Le bruit qui précède la grêle provient de la rencontre des grêlons qui s'entre-choquent dans leurs oscillations.

Tel est, en résumé, le système de Volta. On lui a opposé plusieurs objections : d'abord, le soleil ne peut produire du froid en activant l'évaporation; car l'évaporation ne produit du froid que lorsqu'elle se fait spontanément, et que la chaleur qui doit devenir latente n'est pas fournie par une cause extérieure. D'ailleurs, il se forme de la grêle pendant la nuit; Bellani en cite un cas bien observé, qui s'est présenté en juillet 1806.

On a aussi fait des objections au mouvement oscillatoire des grêlons ; mais elles nous paraissent moins fondées. On a dit que l'étincelle devait jaillir entre les deux nuages, par l'intermédiaire des grêlons interposés ; cependant dans l'*appareil à grêle*, on ne voit pas le plateau supérieur se décharger ainsi, quoique la moelle de sureau conduise mieux que la glace. On a dit encore qu'un grêlon qui aurait pénétré dans le nuage qui l'attire, pour changer d'électricité, ne pourrait pas en sortir. Mais ce grêlon n'arrive pas nécessairement jusqu'au nuage; ce dernier étant entouré d'une couche d'air très humide électrisée comme lui, dans laquelle le grêlon perd son électricité et en prend d'espèce contraire, pour être aussitôt repoussé. C'est ainsi qu'on voit quelquefois, par les temps humides, un pendule isolé, attiré par la machine électrique, en être repoussé avant de l'avoir touchée. On a dit enfin que, si l'électricité des nuages pouvait soulever des grêlons de plus de 500^{gr}, on devrait voir parfois des objets terrestres être attirés par les nuages; mais, si cela n'a pas lieu, c'est que les nuages sont trop élevés au-dessus du sol. Du reste, on voit quelquefois la poussière, les feuilles sèches soulevées à une grande hauteur pendant le calme qui précède l'explosion des orages. Les brins de paille, les feuilles, etc., que renferment certains grêlons (1392), prouvent bien aussi l'attraction des nuages orageux sur les objets terrestres.

Explication de M. Olmsted. — M. D. Olmsted attribue, avec beaucoup d'autres physiciens, la congélation des grêlons, à la basse température des vents du nord dans les hautes régions de l'air [1]. Ces vents, rencontrant des

[1] *Bibliothèque universelle de Genève* (Sciences et arts), 1830, t. LXIV, p. 364.

vents chauds du sud, condensent et congèlent les vapeurs de ces derniers. L'électricité ne joue plus ici de rôle, et n'est qu'un accident du phénomène. Le grossissement des grêlons, qui sont très froids, a lieu pendant leur chute, par condensation de la vapeur des couches d'air traversées; la lenteur avec laquelle ils tombent souvent, leur donnerait le temps d'acquérir ainsi un grand volume. M. Olmsted est le premier qui ait tenté d'expliquer cette lenteur; il l'attribue précisément à la condensation de la vapeur, qui forme une matière *en repos*, que le grêlon doit mettre en mouvement aux dépens de sa vitesse. Cette explication de la grêle ne rend pas compte du bruit qui précède sa chute, ni de la structure des grêlons en couches concentriques. D'un autre côté, il est difficile de concevoir comment les grêlons peuvent acquérir un aussi grand volume, en tombant quelquefois de 1000 mètres au plus, comme cela s'est vu dans un orage cité plus haut, où les nuages ne dépassaient pas le sommet du Puy-de-Dôme. Du reste, le ballottement des grêlons dans la région des nuages a été constaté directement par M. Lecoq, dont les observations contredisent aussi le système de Volta.

Explication de M. Lecoq. — M. Lecoq, étant sur le Puy-de-Dôme, le 28 juillet 1835, a pu assister, pour ainsi dire, à la formation des grêlons [1]. Il vit d'abord, vers midi, des nuages chassés par le vent d'ouest, passer à quelques mètres au-dessus de sa tête, et d'autres, poussés par le vent du sud, et qui semblaient se détacher du mont Dore, s'étendre encore plus bas. Vers une heure, ces derniers se réunissaient par petits groupes formant de gros nuages noirs et épais, que le vent ne déplaçait qu'avec peine. Le dessous de ces nuages s'allongeait en formant une énorme protubérance, dont il s'échappait des torrents de pluie, inondant des espaces très circonscrits. Cependant, le vent d'ouest ayant accumulé un rideau de nuages au-dessus des nuages blancs venant du sud, ces derniers formèrent de grandes masses séparées, entre lesquelles jaillissaient des éclairs; mais aucun ne partait entre les deux couches de nuages. M. Lecoq vit alors la grêle tomber des nuages *inférieurs*, en face de lui, à 50 mètres du sommet du Puy-de-Dôme. Les grêlons s'échappaient *par dessous* et *par dessus*, dans toutes les directions, comme obéissant à une répulsion. Le nuage qui les lançait avait ses bords dentelés et animés d'un mouvement tourbillonnant particulier, qui paraissait n'appartenir qu'au bord antérieur. Cette agitation extraordinaire s'arrêta au bout de 5 à 6 minutes, et la grêle cessa de tomber.

Vers les 3 heures, le même observateur étant monté sur le *Puy-des-Goules*, fut enveloppé par un nuage à grêle dans lequel il séjourna pendant 5 minutes. Les grêlons, gros comme des noisettes, et composés de couches concentriques, étaient animés d'une grande vitesse horizontale; ils tournaient rapidement sur eux-mêmes, et ne tombèrent qu'à une demi-lieue plus loin.

M. Lecoq a conclu de ces observations, que deux couches de nuages sont

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LXI, p. 211.

nécessaires pour la production de la grêle, mais que les grêlons n'oscillent pas d'un nuage à l'autre, comme le supposait Volta. Les grêlons sont transportés horizontalement par le vent, et grossissent à la partie antérieure du nuage, qui pénètre dans l'air plus chaud, dont ils condensent l'humidité; pendant ce temps, le nuage supérieur électrisé les soutient et les empêche de tomber avant qu'ils n'aient acquis un certain volume. Le bruit qui précède la chute de la grêle ne serait pas dû au choc des grêlons entre eux, mais à une sorte de sifflement qu'ils produiraient en fendant l'air.

Cette théorie n'explique pas pourquoi les grêlons présentent des couches distinctes; de plus, on ne peut dire qu'il y ait toujours une couche supérieure de nuages soutenant les grêlons dans le nuage inférieur. Il n'y en a pas, par exemple, dans les orages, formés par une colonne d'air ascendante.

Explication de Peltier. — Cette explication est une modification de celle de Volta : plusieurs nuages en présence agissent par influence les uns sur les autres, et il y a des échanges d'électricité favorisés par les aspérités des surfaces des nuages. Ces mouvements d'électricité activent l'évaporation (1271), d'où résulte du froid, qui produit des parcelles de glace. Celles-ci se repoussent, et s'agitent soit dans l'espace où elles se sont formées, soit entre des nuages superposés, en produisant les mouvements observés par M. Lecoq. Pendant ces mouvements, les grêlons grossissent, la couche qui se dépose à leur surface s'évapore en partie, en changeant d'électricité, principalement à chaque coup de tonnerre; elle se refroidit ainsi et condense de nouvelles vapeurs. Mais il est bien difficile d'admettre que l'électricité active l'évaporation au point qu'il faudrait pour expliquer l'accroissement rapide des grêlons.

1395. Conclusion. — Théorie proposée. — On voit que les différents systèmes que nous venons d'analyser soulèvent des objections sérieuses. Les auteurs qui les ont proposés, à l'exception de M. Lecoq, ont supposé les nuages tout formés d'avance, tandis que c'est pendant leur formation même que la grêle prend naissance. Le phénomène est donc passager; s'il semble durer, c'est qu'il se reproduit par la persistance de deux vents qui se rencontrent, et par la condensation continuelle de nouvelles vapeurs. En tenant compte de toutes les circonstances du phénomène, nous pensons que l'on peut formuler ainsi une théorie de la grêle [1].

1° Les nuages à grêle sont ordinairement engendrés par deux vents opposés, l'un froid et l'autre chaud : quand le conflit n'est pas trop violent, ou que le vent chaud domine dans le mélange, on a un orage sans grêle; mais si le choc étant violent, la quantité d'électricité accumulée est considérable, on a de la grêle. Beccaria avait remarqué que la grêle prend naissance dans des nuages venant de régions opposées : « Lorsque, dit-il, les nuages sont agités de mouvements très rapides, la pluie tombe en général en grande abondance, et si l'agitation est excessive, en général il grêle. »

[1] *Mémoires de l'Académie des sciences de Toulouse*, 5e série (1858), t. II, p. 110.

2° L'électricité qui s'accumule dans les nuages qui se forment (soit qu'elle provienne de celle que contenaient les masses d'air mélangées, soit qu'elle prenne naissance dans le choc même) détermine une répulsion entre les gouttelettes et les molécules d'air humide qui les composent. De là expansion, gonflement, et production de ces contours arrondis et nettement terminés que présentent les nuages orageux. Cette expansion est accompagnée, quand il y a beaucoup d'électricité, d'un grand refroidissement, qui se joint à celui qu'apporte le vent froid, et de nouvelles vapeurs se condensent en aiguilles de glace qui, s'amassant en petites pelottes, forment du grésil.

3° Ces grains sont très froids, et immédiatement animés, dans l'intérieur du nuage, de mouvements tumultueux dûs à deux causes : 1° il se produit des tourbillons d'air, résultant de la rencontre des deux vents contraires, qui ne marchent presque jamais suivant la même ligne droite ; 2° les différentes parties du nuage sont composées de masses d'air à différentes températures, tenant en suspension des quantités variables de gouttelettes, électrisées à des degrés différents ou d'une manière opposée [1]. Les grains de grésil seront donc sollicités dans diverses directions, prendront l'électricité des régions qu'ils traverseront, seront repoussés d'un autre côté, et éprouveront ainsi une agitation qui s'ajoutera à celle que produisent les tourbillons d'air. C'est là le phénomène observé par M. Lecoq. S'il y a deux couches de nuages, leur influence mutuelle accumulera l'électricité d'un même nuage sur l'une de ses faces, et l'inégalité de distribution électrique qui occasionne l'agitation sera encore plus prononcée.

4° Dans ces mouvements, auxquels participent en partie les amas de gouttelettes du nuage, comme le prouve l'agitation que l'on a observée sur ses bords, les grêlons augmentent de volume : si les grêlons sont très froids, la vapeur se condense à leur surface *à l'état solide*, en formant une couche opaque de givre ; s'ils se sont échauffés à la surface, soit par la chaleur latente abandonnée par la vapeur condensée, soit par leur passage dans des parties du nuage où domine l'air chaud, la vapeur se dépose à l'état liquide, et ne se congèle qu'un instant après en formant une couche amorphe de verglas, qui peut aussi être augmentée par les gouttes d'eau que rencontrent les grêlons. Cette couche transparente sera suivie d'une nouvelle couche opaque, si la surface du grêlon vient à se refroidir de nouveau en passant par des points où l'expansion se fait vivement, et où domine l'air apporté par le vent du nord. A la fin, l'expansion du nuage ne se faisant plus, et la charge électrique étant devenue plus uniforme, ainsi que la température, la vapeur ne se condense plus qu'à l'état liquide, et les grêlons se revêtent d'une couche de glace transparente, par laquelle ils peuvent se souder, et dans laquelle peuvent être englobés, comme l'a observé M. Boisgiraud (1394), quelques grains de grésil qui se

[1] Volta a vu quelquefois les indications d'un électromètre armé d'une pointe et exposé à l'action d'un nuage orageux, changer jusqu'à 14 fois dans une minute.

forment encore. Les pointes coniques qui recouvrent les grêlons (*fig.* 1027) s'expliquent par l'accumulation des gouttes d'eau qui oscillent dans le nuage, sur les aspérités accidentelles que présentent ces grêlons, aspérités sur lesquelles l'électricité s'accumule, de manière à attirer ces gouttes quand elles sont électrisées moins fortement, ou d'une manière opposée.

La structure rayonnante est la conséquence de la tendance des molécules aqueuses à se déposer en petits prismes perpendiculaires aux surfaces, ainsi qu'on l'observe dans le givre (II, 1170).

5° On voit que les grêlons sont soutenus par l'air qui tourbillonne, comme l'avait déjà supposé M. Saigey, et par l'électricité variable des différents points du nuage. Quand ils ont acquis un certain volume, leur vitesse acquise et leur répulsion mutuelle les font sortir dans toutes les directions, la pesanteur l'emporte sur les causes qui les soutiennent, et ils s'échappent du nuage qui les a engendrés et nourris. Ce résultat final est avancé par la décharge du nuage, favorisée par le mouvement même des grêlons; s'il se fait des explosions entre ses différentes parties, ou bien avec un autre nuage, la grêle tombera aussitôt, et il y aura une recrudescence dans l'averse.

6° Tout ce que nous venons de dire peut s'appliquer aux gouttes d'eau, quand la température ne s'abaisse pas assez pour qu'il y ait congélation. De là l'explication de la grosseur des gouttes de pluie d'orage; elles sont agitées pendant quelque temps dans le nuage, de manière que plusieurs se réunissent en se rencontrant. Chaque coup de tonnerre détermine aussi une recrudescence de pluie,

7° La lenteur avec laquelle tombent souvent les grêlons peut s'expliquer par le mouvement ascendant de l'air, qui se porte vers la nuée, où la condensation des vapeurs doit produire une raréfaction que le gonflement électrique du nuage est loin de compenser. Il peut se faire aussi que les grêlons, en tombant, trouvent des couches d'air électrisées par influence d'une manière contraire au nuage, et soient alors retardés dans leur chute par l'attraction de ce dernier. On a remarqué en effet, quelquefois, qu'ils frappaient les toits avec peu de force, mais qu'après avoir roulé jusqu'au bord, ils tombaient sur le pavé avec toute la vitesse due à la hauteur du toit, comme s'ils avaient perdu, en le touchant, l'électricité qui retardait leur chute.

8° Quand la grêle se forme dans un nuage produit par une colonne d'air ascendante, le phénomène dure peu. Quand le nuage est formé par la rencontre de deux vents opposés, le foyer de la grêle se déplace dans le sens du vent le plus violent, et le nuage se renouvelle continuellement, en versant sans cesse de la grêle, qui ravage une bande étroite de pays plus ou moins longue.

9° Dans les régions du nord et sous l'équateur au niveau de la mer, on ne voit pas de grêle ; c'est que les vents du nord, comme l'a remarqué M. Olmsted, quand ils parviennent entre les tropiques, n'amènent qu'une faible masse d'air qui s'est notablement réchauffée ; de sorte que l'air chaud, dont la masse est relativement plus considérable, empêche le refroidissement d'être suffisant pour

qu'il y ait congélation. Dans les régions du nord, le vent chaud qui vient de l'équateur s'est refroidi dans la longue route qu'il a parcourue, et il n'y a que peu de différence de température entre les vents qui se choquent, et le grésil tombe à mesure qu'il se forme. Pendant l'hiver, la grêle proprement dite est rare, par un motif analogue. On voit donc que la grêle est propre aux latitudes moyennes, et qu'elle doit s'y montrer pendant les chaleurs.

1396. Des paragrêles. — On a cherché à préserver les campagnes des ravages de la grêle, au moyen de perches armées de pointes de fer communiquant avec le sol, et nommées *paragrêles*. Ces appareils étaient destinés à décharger les nuages orageux, et pendant quelque temps ils ont eu une grande vogue; par exemple, toute la côte du lac de Genève, dans le canton de Vaud, en était garnie. Mais on ne tarda pas à reconnaître l'inefficacité de ces espèces de paratonnerres. Si le foyer où se forme le météore était fixe, et si l'électricité ne s'y renouvelait pas continuellement, les pointes pourraient, en déchargeant les nuages, empêcher les grêlons de se former; mais ce foyer se déplace rapidement; il peut même arriver, comme il paraît que l'observation l'a démontré, que le nuage arrivant sur un pays garni de paragrêles, y verse aussitôt une grande quantité de grêlons, qui seraient tombés plus loin, si les pointes n'avaient pas déchargé le nuage.

1397. DES TROMBES. — Une trombe consiste en une colonne de la nature des nuages, plus ou moins inclinée et contournée, allant d'une nuée à la surface de la terre, et animée le plus souvent d'un mouvement giratoire rapide, et d'un mouvement de translation. L'air tourbillonne souvent jusqu'à une certaine distance autour de la colonne, et au-delà règne un calme complet. La couleur est d'un gris sombre, comme celle des nuages, ou noire comme la fumée de la houille. Le diamètre inférieur est très variable; il peut avoir moins de 1 mètre, et parfois plusieurs mètres. Le phenomène n'a que peu de durée : il ne paraît pas qu'on l'ait vu durer une heure entière. On distingue les trombes qui se forment sur les eaux, et les trombes de terre.

Trombes de mer. — Ces trombes se forment généralement dans les grandes chaleurs. On aperçoit d'abord un point de la base sensiblement plane d'un nuage orageux, s'abaisser en forme de protubérance conique, qui s'allonge plus ou moins rapidement en s'inclinant et flottant sous l'action du vent. En même temps, les eaux de la mer semblent bouillonner et sont soulevées en formant une espèce de brouillard semblable à celui qui sort d'une chaudière à vapeur. Souvent le cône supérieur se replie, et la trombe ne s'établit pas. D'autres fois, le brouillard inférieur s'unit au cône descendant, et alors la trombe est constituée. Dans la *fig.* 1028, on voit deux trombes de mer au moment où elles viennent de se former.

Quelquefois la trombe commence par l'ascension du brouillard, qui part des eaux et s'élève peu à peu jusqu'aux nuages; on la nomme alors *trombe ascendante*, appliquant le nom de *trombe descendante* à celle qui commence par un cône venant des nues. Quand la trombe est constituée, on entend un grand

bruit semblable à celui d'une cascade. Malheur au navire qui se trouve engagé dans le tourbillon ; il est entraîné et submergé. Les marins ont coutume, pour conjurer le danger, de lancer des boulets à travers la colonne; et parviennent quelquefois à la rompre. M. Napier ayant ainsi coupé une trombe en deux, vit les deux parties, ballottées par le vent, tendre l'une vers l'autre et finir par se réunir de nouveau.

Quand une trombe est près de disparaître, on voit à sa partie inférieure, au-dessus du bouillonnement des eaux, un tube délié et transparent, remarqué d'abord par Al. Stewart, et dans lequel on voit l'eau monter comme la fumée

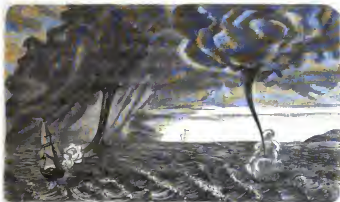


Fig. 1028.

dans une cheminée. M. Leps compare l'aspect de la trombe, en ce moment, à un long entonnoir d'où s'échapperait une veine liquide représentée par la partie transparente, et faisant jaillir l'eau de la mer. Ordinairement, le nuage donne aussitôt une pluie torrentielle d'*eau douce*.

On a vu plusieurs trombes sortir d'un même nuage; ainsi, le capitaine Beechey a observé une trombe qui présentait trois cônes partant d'un même pavillon; elles se réunirent bientôt pour se séparer de nouveau. Lamarck cite une trombe observée le 31 juillet 1808, entre deux groupes de nuages. Les trombes de mer sont propres aux mers orageuses; elles sont assez fréquentes dans les régions calmes d'entre les tropiques, et rares dans les pays froids.

Trombes terrestres. — Les trombes terrestres sont moins fréquentes que les autres; heureusement, car elles produisent des dévastations épouvantables. Leur apparition est précédée d'une chaleur étouffante, et d'un calme complet. Le baromètre baisse ordinairement très rapidement; par exemple, on l'a vu descendre de 16^{mm},34, à Rouen, pendant l'heure qui précéda la trombe de Monville et Malaunay, à 15 kilomètres de là. Pour donner une idée du mode de formation et des effets des trombes terrestres, nous citerons celle de

Chatenay et celle de Monville, qui ont été l'objet d'enquêtes attentives, et ont produit des effets intenses. Voici d'abord, d'après Peltier et M. Bouchard, l'histoire de la trombe de Chatenay [1].

Le 18 juin 1839, un orage, formé dès le matin et venant du sud, s'était dirigé entre les collines d'Ecouen et le monticule de Chatenay, au-dessus duquel les nuages parurent s'arrêter. Vers midi, un second orage, venant aussi du sud, s'approcha rapidement, puis s'arrêta en présence du premier, qui le dominait, et semblait le repousser. Tout à coup un des nuages du second orage s'abaissa vers le sol et se mit en communication avec lui; aussitôt le tonnerre, qui grondait fortement, cessa tout à fait, et il s'éleva un effroyable tourbillon de poussière et de corps légers, accompagné d'un bruit confus très intense. Des habitants virent alors le météore sous la forme d'un cône renversé, de couleur grise, dont la pointe était à quelques mètres du sol, et terminée par une calotte de feu d'un rouge vif. Cette trombe se mit en marche dans la direction du nord-est, en brisant et déracinant les arbres, dont le tronc fut complétement desséché du côté atteint, et *clivé*, c'est-à-dire divisé en minces lanières. La trombe enleva ensuite le toit de deux fermes, ravagea le parc de Chatenay, dont les murs furent renversés, et se dirigea vers le château, dont elle emporta les cheminées et les toits. Presque tous les pigeons du pigeonnier de la ferme furent tués; leur chair se corrompit immédiatement. Telle était l'épouvante que répandait le terrible météore, qu'on vit des lapins du parc venir se mettre à l'abri près de la maison, à côté des chiens, tout aussi effrayés qu'eux. La trombe traversa ensuite un étang, dont les poissons furent tués, et où elle perdit presque toute sa force. A 100 mètres de là, elle se partagea; la partie supérieure s'éleva en nuage, et l'autre tomba et disparut sur le sol. Les ravages de cette trombe s'étendirent sur une longueur de 4 kilomètres et sur une largeur d'environ 150 mètres. Des arbres de 1 mètre de tour furent déracinés et transportés à plus de 100 mètres; des chevrons, des tuiles et divers débris, furent trouvés à plus de 500 mètres. Des observateurs aperçurent des boules de feu, des lueurs diverses. Dans une cheminée du château, on vit des étincelles monter et descendre; des rideaux furent déchirés et roussis. Divers objets de lingerie laissés dans une chambre bien close, furent trouvés au loin dans la campagne; ils n'avaient pu sortir que par la cheminée.

La trombe de Monville et Malaunay produisit des effets encore plus épouvantables [2]. Le 19 août 1845, il régnait aux environs de Rouen un vent violent du sud; dans l'après-midi, un vent du sud-ouest, chassant des nuages très noirs, rencontra le vent du sud, et forma un violent tourbillon, animé d'un mouvement de translation, qui arracha 180 gros arbres en les tordant presque tous, et renversa une sécherie dépendant d'une fabrique d'indiennes. Au même moment, il tomba une forte averse accompagnée de grêle et de tonnerre. Il n'y

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. IX, p. 134.

[2] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XXI, 545.

avait pas encore de trombe proprement dite. Après s'être éloigné et avoir parcouru 4 kilomètres, ce tourbillon revint tout à coup dans la vallée, près de Malaunay et Monville, en traversant un bois, dont les arbres furent brisés près de leur base. C'est alors qu'il se forma un énorme cône à contours nettement dessinés, et noir comme la fumée du charbon de terre. Le sommet était d'un jaune rouge; des éclairs s'échappaient du cône, et l'on entendait un fort roulement. En quelques secondes, la trombe se porta successivement, avec une rapidité effrayante et en zig-zag, sur trois filatures considérables qu'elle écrasa avec tous leurs ouvriers. Les toits furent soulevés, et il ne resta pas pierre sur pierre! Les métiers étaient brisés, tordus; les fortes piéces étaient brisées, principalement dans les endroits où il y avait de grosses masses de métal. Les arbres, dans les environs, étaient renversés en tous sens, clivés et desséchés sur une longueur de 2 à 7 mètres. En déblayant, pour tâcher de sauver les malheureux ensevelis sous les ruines, on remarqua que les briques étaient brûlantes. On trouva des planches charbonnées, du coton brûlé et roussi; beaucoup de piéces de fer ou d'acier se trouvérent aimantées. Des cadavres présentaient des traces de brûlures; d'autres ne présentaient pas de lésions apparentes, comme s'ils avaient été frappés de la foudre. Des ouvriers qui furent lancés dans les prairies environnantes, s'accordèrent à dire qu'ils avaient vu de vives lueurs, et senti une forte odeur de soufre. Des personnes placées sur des hauteurs, ont vu les usines enveloppées par la trombe, couvertes de flammes et de fumée, et crurent à un incendie. La largeur de la bande ravagée était de 220 métres sur le plateau de Malaunay, à 2 kilomètres du point où les dégâts avaient commencé; de 307^m au milieu; et de 60^m prés de Clères, où la trombe disparut. La longueur de la bande, à vol d'oiseau, était de 15 kilométres.

Un fait très remarquable, c'est que des débris de toute sorte, ardoises, vitres, planches, chevrons, tombérent près de Dieppe, à une distance de 25 à 38 kilométres du lieu de la catastrophe! Ces divers objets furent aperçus dans les airs par plusieurs personnes, qui les prirent pour des feuilles d'arbres, tant ils étaient élevés. Parmi ces débris, on cite une planche de 1^m,4 de longueur, de 0^m,12 de largeur et de 0^m,01 d'épaisseur. Toutes les trombes, heureusement, ne sont pas aussi désastreuses que celles que nous venons de citer.

1398. De la théorie des trombes. — Il y a peu de temps qu'on est parvenu à expliquer les principaux effets des trombes. Franklin, Muschenbroeck, Monge..., les considéraient comme des tourbillons d'air, engendrés par la rencontre de deux vents opposés. Mais on a vu des trombes naître et disparaître au milieu du calme le plus parfait. M. Espy regarde les trombes de mer comme de très petits tornados (II,1152); outre que cette explication ne peut guère s'appliquer aux trombes terrestres, elle ne tient pas plus compte que la précédente des effets calorifiques et électriques qu'on a observés. Brisson paraît être le premier qui ait attribué les trombes à l'électricité; il les regarde comme dues à une communication électrique entre les nuages orageux et le

globe. Peltier, dans son Traité des trombes, a repris cette explication, et aprés avoir comparé les récits de 116 trombes, dont 56 de mer et 60 de terre, il a établi la théorie suivante, qui rend bien compte de l'ensemble des phénomènes, et s'applique également aux trombes de terre et de mer.

Considérons un nuage très dense et fortement électrisé ; ce nuage agira par influence sur le sol, en sera attiré et tendra à s'abaisser. Quand il sera assez bas, il pourra donner des coups de foudre ; mais s'il est trés dense, certaines parties pourront obéir plus complètement à l'attraction électrique du sol, et formeront une protubérance sur la base à peu près plane du nuage. Cette protubérance s'allongera rapidement en cône, parce que l'électricité s'y accumulera de plus en plus, à cause de sa forme même, et parce que sa distance à la terre diminuera.

Si le cône se forme au-dessus de la mer, l'eau sera soulevée, et divisée en gouttelettes par la répulsion de ses molécules, et s'élancera vers le sommet du cône descendant. S'il se forme au-dessus de la terre, les corps légers seront attirés, se précipiteront vers le sommet du cône, seront repoussés aprés en avoir partagé l'électricité, et formeront un nuage de poussière. En même temps, le nuage se déchargeant rapidement, par le *conducteur imparfait* que lui offre la trombe, le tonnerre cessera de se faire entendre.

Une fois la trombe en communication avec le sol, les objets terrestres sont vivement attirés, enlevés à une grande hauteur, et transportés au loin, comme à Monville ; les arbres sont arrachés et emportés, souvent contre la direction du vent. On a vu des planchers, des pavés soulevés ; des étangs entiérement desséchés. Plusieurs fois, des hommes ont été saisis et transportés au loin. Le 26 août 1826, aux environs de Carcassonne, une trombe enleva dans les airs 14 moutons, qui se trouvérent en un moment fort loin de leur point de départ. Quand la trombe a une grande puissance, les toits sont soulevés et retombent brisés, comme à Chatenay et à Monville ; des objets légers sont comme aspirés, par des cheminées. Les arbres non arrachés, servant de conducteurs imparfaits à l'électricité, sont échauffés et desséchés ; la sève, réduite subitement en vapeur, fait éclater le bois en longues bandes, et l'arbre se brise au milieu de la partie *clivée*. Cependant, les branches ne sont pas ainsi desséchées, l'électricité n'éprouvant pas de résistance à les traverser, à cause de leur grand nombre. A Monville, aucun des arbres résineux n'a été clivé ; probablement à cause de leur mauvaise conductibilité.

Les globes de feu, les étincelles, les éclairs, signalés par divers observateurs ; la carbonisation du bois, la fusion de métaux, observées en certains cas[1] ; des vitres percées sans être étoilées ; l'état des cadavres ne présentant

[1] Parmi les effets d'une trombe qui exerça ses ravages dans la commune d'Escalquens, près de Toulouse, le 19 sept. 1844, M. l'abbé Chambon cite la fusion partielle des soudures d'une boule et d'un croissant en zinc qui surmontaient un pigeonnier (*Comptes-rendus de l'Acad. des sc. de Paris*, t. XIX).

aucune lésion extérieure, leur rapide décomposition....., tout prouve la présence de l'électricité en quantité énorme. A Monville, la trombe s'est portée de préférence sur les usines remplies de machines et de masses métalliques de toutes sortes, en contournant, comme pour les éviter, les maisons d'habitation qui se trouvaient sur son passage, excepté une dont le grenier était rempli de ferrailles, et qu'elle renversa en y produisant un commencement d'incendie. La trombe de Chatenay fut épuisée dés qu'elle fut arrivée dans un étang, où elle perdit rapidement son électricité en rencontrant un sol meilleur conducteur. Enfin, on a vu plusieurs fois, de petits nuages parasites monter et descendre le long des trombes, par exemple à Chatenay, et reproduire ainsi le phénoméne de la danse électrique (1271). Quant au bruit qui accompagne le météore, on l'explique par les décharges électriques partielles qui se font dans son sein, et avec les objets terrestres.

Expériences à l'appui. — Peltier a cherché à reproduire au moyen de l'électricité, quelques effets des trombes. Ayant exposé de l'eau à l'action d'une boule métallique constamment électrisée, il vit, comme autrefois Brisson, l'eau s'élever en cône au-dessous de la boule. Ayant ensuite garni cette boule de petites pointes, pour imiter les inégalités des nuages, il vit une dépression se former sur l'eau, comme cela a lieu parfois dans les trombes marines. De plus, des courants s'établirent en rayonnant, à la surface du liquide, et furent suivies d'un mouvement giratoire, tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre, suivant l'inégalité des résistances. Le même physicien produisit des tourbillons dans de la fumée de résine ou dans ces légers brouillards qui s'échappent de l'eau chaude. Quand la perte par les pointes était faible et la tension très forte, le liquide s'élevait en masse. Si l'on met entre une boule électrisée et un plateau métallique non isolé, d'étroites bandes d'or battu, on les voit s'étendre entre ces deux corps et tourbillonner, tout en donnant passage à l'électricité ; reproduisant ainsi le mouvement giratoire qui anime beaucoup de trombes.



Fig. 1029.

A ces expériences, faites ou citées par Peltier, nous ajouterons celles qui suivent, quoiqu'elles n'aient pas été faites pour étudier les trombes. M. Armstrong remplit presque entièrement d'eau distillée deux verres à pied A et B (*fig.* 1029), dont les bords étaient à 12 millimétres environ l'un de l'autre, et il les réunit au moyen d'un fil de soie humide *c*, qui plongeait dans les deux verres. Ayant mis ensuite le vase A en communication avec la chaudiére d'une puissante machine hydro-électrique (1279), et l'autre, B, avec le sol, une légére colonne d'eau, à laquelle le fil servait d'axe, se forma en *c*, et le fil se mettant en mouvement, passa tout entier dans le verre B, en marchant dans le sens du courant d'électricité *négative* La colonne d'eau *c* subsista encore quelques secondes sans être

soutenue par le fil, puis elle se sépara, et l'électricité passa par étincelles entre les deux verres. Si le fil de soie était fixé au fond du vase A, on voyait l'eau monter dans ce vase, et baisser en B; et si l'on projetait un peu de poussière sur la colonne *c*, on reconnaissait qu'il y avait un courant superficiel allant de B en A, en sens contraire d'un autre courant intérieur allant de A en B, et qui avait entraîné le fil de soie. Ayant réussi à maintenir la colonne en *c*, pendant plusieurs minutes sans l'intermédiaire du fil, M. Armstrong ne vit aucun changement de niveau dans les deux vases; d'où il conclut que les courants d'eau extérieure et intérieure étaient égaux. — Il y a ici une petite colonne liquide se soutenant malgré la pesanteur, sous l'influence d'un courant abondant d'électricité, et l'on reconnaît l'existence d'un double courant d'eau; ce qui explique le transport des corps dans les trombes, et montre pourquoi celles de mer sont suivies d'une pluie d'eau douce; c'est que l'eau de mer aspirée redescend avant d'être arrivée jusqu'au nuage.

On voit que l'explication des trombes par l'électricité, satisfait bien aux conditions générales du phénoméne. Ce n'est pas à dire pour cela qu'il ne puisse se former, par la rencontre de deux vents contraires, des tourbillons capables de produire des effets mécaniques intenses, tourbillons analogues à ceux que nous voyons sur les chemins enlever la poussière et les feuilles sèches. Il peut aussi se former, dans certains cas, de petits *tornados*, soit sur mer, soit sur les plaines sablonneuses. C'est sans doute à l'une de ces causes qu'il faut attribuer ces trombes de sable observées dans les déserts, notamment par de Humboldt dans les plaines du Pérou, et les trombes sans nuages que l'on a vues quelquefois sur mer, et dans lesquelles il y avait mouvement giratoire. Pour décider la question, il faudrait avoir sur ces phénomènes, qui paraissent très rares, des détails circonstanciés.

1399. Pluies de crapauds, de poissons, etc. — Il paraît bien prouvé aujourd'hui qu'on a vu tomber en temps d'orage, des pluies de petits animaux. Nous pouvons nous appuyer sur l'autorité incontestable de Peltier, qui vit tomber, à Ham, une pluie de crapauds; le sol en était couvert, et il en reçut sur son chapeau et sur ses mains. D'autres observateurs furent témoins de phénoménes analogues ; non seulement ils virent la terre couverte de ces animaux, mais encore ils purent constater qu'ils tombaient des nuages, car ils en reçurent sur leurs habits. Parfois quelques-uns de ces crapauds étaient encore à l'état de têtard ; d'autres fois, ils étaient remplacés par de petites grenouilles. On a observé aussi des pluies de poissons : M. Vital Masson, curé d'une commune de la Loire-inférieure, vit tomber, en 1820, pendant une pluie d'orage, une infinité de petits poissons ayant environ 2 centimètres de longueur. La même année, on trouva, près de Nantes, la campagne couverte sur une étendue de 400 pas, de poissons ayant près de 3 centimètres. M. de Castelneau, après une pluie tellement épaisse qu'on ne distinguait pas à 3 pas, vit, à Singapore, le sol couvert de poissons de 25 à 30^{cm} de long, appartenant à une espèce (clarias batrachus) abondante dans les eaux douces des îles asiatiques.

Ces poissons peuvent cheminer quelque temps hors de l'eau ; mais l'île de Singapore en renferme trop peu pour expliquer l'immense quantité observée ; et, du reste, on en a trouvé un grand nombre dans une cour complètement fermée. — En Ecosse, on a constaté une pluie de harengs, et dans l'Amérique méridionale, une pluie de sangsues. On a vu enfin des pluies de paille, des pluies de sable.

Ces phénomènes singuliers ont été longtemps regardés comme fabuleux. On a cependant tenté de les expliquer par des bourrasques qui auraient enlevé et transporté au loin les corps que l'on a vu tomber. Mais ils s'expliquent bien plus facilement en supposant qu'une trombe a enlevé ces animaux de préférence aux autres objets, à cause de leur bonne conductibilité électrique, et les a laissé tomber plus loin. Ce que nous avons dit d'une pluie de débris de toutes sortes, qui tomba à 25 kilomètres des usines où la trombe de Monville avait exercé ses ravages, vient à l'appui de cette explication. Nous ajouterons les faits suivants : le 8 juillet 1833, une trombe se forma sur mer, à la pointe de Pausilippe, près de Naples, et fit irruption sur le rivage, où des oranges contenues dans deux grandes corbeilles disparurent subitement. Quelques instants après, on vit tomber sur une terrasse assez éloignée, une pluie d'oranges [1]. Mauduit observa, le 13 septembre 1835, dans le pays de Caux, une trombe qui enleva toute l'eau d'une mare avec ses poissons. Or, ces animaux ont dû retomber tôt ou tard, et former quelque part une pluie de poissons.

IV. De l'électricité de l'atmosphère et de son origine.

1400. Lorsque, vers le milieu du XVIII[e] siècle, on eut appris à reconnaître l'électricité des nues orageuses, au moyen de barres isolées (1360), on ne tarda pas à remarquer que ces barres donnaient des signes d'électricité par un ciel serein. Ce résultat important fut découvert par Lemonnier, qui obtint des étincelles, par un ciel sans nuages, d'une longue tige de fer isolée et terminée en pointe qu'il avait dressée dans un jardin à Saint-Germain-en-Laye. L'air est donc habituellement électrisé. Il remarqua aussi que la quantité d'électricité est soumise chaque jour à des variations régulières quand le ciel est pur ; mais qu'il n'y en a aucun signe par les grands vents, ni lorsque le ciel est couvert de gros nuages noirs marchant lentement, ni enfin par les temps humides mais sans pluie.

1401. Manière d'observer l'électricité de l'atmosphère. — On emploie tantôt des appareils fixes, comme la barre de Lemonnier, tantôt des appareils portatifs. Les premiers sont difficiles à isoler. Read est un de ceux qui ont le mieux réussi dans leur construction ; son appareil consistait en un

[1] Garnier. *Traité de météorologie*, p. 306.

mât en sapin surmonté d'une pointe en fer, et appuyé sur un cylindre en verre enduit de gomme laque et placé dans la chambre la plus élevée de la maison; le mât traversait le toit sans le toucher. Des fils de cuivre, partant de la pointe de fer, descendaient le long du mât, et venaient se réunir à une boule isolée, dont on interrogeait l'état électrique. Un carillon avertissait d'une tension trop forte, et un conducteur communiquant avec le sol pouvait être alors mis en contact avec la boule.



Fig. 1030 — 1/8.

De Saussure employait un électromètre à balle de sureau (*fig.* 1030) garanti de la pluie par un chapeau *c*, et surmonté d'une longue pointe composée de plusieurs parties pouvant se visser en *a*, *a*, pour rendre l'instrument plus portatif. Sur deux faces opposées de la cloche de verre, sont tracés des arcs divisés; une table de graduation, construite par la méthode de Saussure (1273), permet d'évaluer les charges électriques, au moyen des angles d'écart. Nous avons vu que, avec des brins de paille, les charges sont proportionnelles aux angles, jusqu'à 30°, quand ces pailles ont plus de 27^{mm} de longueur.



Fig. 1031.

Volta a aussi imaginé de mettre à l'extrémité de la tige *ca*, un corps enflammé donnant une colonne de fumée qui va recueillir l'électricité de l'air. Quand il faisait du vent ou de la pluie, il allumait une mèche de coton soufrée, placée dans une hélice en fil de fer. Mais ce moyen peut donner lieu à des erreurs, parce que, comme nous le verrons, la combustion est une source d'électricité. Quand la tension de l'air était très faible, il employait l'électromètre à condensateur (1322), dont le plateau inférieur était mis en relation avec l'atmosphère, tandis que le plateau supérieur communiquait avec le sol.

On procède encore en lançant à travers l'air une balle métallique qui prend l'électricité de tous les points où elle passe (*fig.* 1031). Cette balle est attachée par un fil conducteur, à un anneau *a* qui glisse le long de la tige *b* et se sépare de l'appareil quand la balle est lancée avec assez de force. MM. Becquerel et Breschet, dans leurs observations au grand Saint-Bernard, ont remplacé la boule par une flèche qu'ils lançaient avec un arc. Le cordon, qui avait 80 mètres de long, était d'abord replié en zig-zag sur une feuille de taffetas isolant étendue par terre. Dans ces expériences, la tige *b* ne doit pas être terminée en pointe, afin que l'appareil conserve son électricité, et qu'on puisse en reconnaître la nature.

Electromètre de Peltier. — B (*fig.* 1032) est un globe creux en cuivre,

de 10 centimètres de diamètre, porté par une tige munie d'un chapeau *c* et d'une petite boule *b*. Cette tige entre dans la cage de verre, dont elle est isolée par un bourrelet de gomme laque, et porte un anneau vertical *aa*, maintenu par de la gomme laque renfermée dans un cylindre en verre fixé au pied de l'instrument. L'anneau soutient une pointe verticale sur laquelle pivote une aiguille courbe en cuivre, *oo*, dont la chappe porte une petite aiguille aimantée *e*. Une tige de cuivre A est fixée horizontalement au-dessous de l'anneau *aa*. Pour se servir de cet électromètre, on commence par le placer de manière que l'aiguille *oo*, dirigée par l'aiguille aimantée *e*, soit dans le même plan vertical que la tige A. Si alors l'anneau *aa* reçoit de l'électricité, ce fluide se répand sur la tige A et sur l'aiguille *oo*, qui s'en écarte aussitôt. L'angle d'écart est donné par deux divisions, l'une tracée autour de la cage cylindrique, et l'autre sur le couvercle ; et la charge électrique, par une table construite au moyen d'un second appareil identique, en suivant la méthode de Saussure (1273). Pour transporter l'instrument, on fait tourner la boule *b ;* alors, une petite pièce que l'on voit au haut de l'anneau *aa*, sur le prolongement de la tige centrale, descend et arrête l'aiguille *oo*.

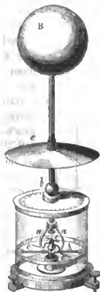


Fig. 1032 1/4.

Au lieu de la boule B, on peut visser au sommet de la tige, une pointe ou une houppe de fils de platine ; alors l'appareil s'électrise par influence, et reste chargé d'électricité de même nom que celle de l'atmosphère. Quand il porte la boule B, cette boule reçoit l'électricité opposée à celle de l'air, et les aiguilles, l'électricité de même nom ; en touchant la boule *b*, on chasse cette dernière dans le sol, et l'appareil conserve le fluide contraire à celui de l'air.

Réomètre multiplicateur. — M. Colladon a le premier appliqué le *réomètre multiplicateur* (II,711) à l'étude de l'électricité atmosphérique. L'un des bouts du fil qui entoure l'aiguille aimantée communique avec une longue pointe isolée, et l'autre bout, avec le sol. Les tours du fil de cuivre du réomètre doivent être isolés les uns des autres avec beaucoup de soin ; pour cela, on trempe la soie qui les recouvre, dans une dissolution concentrée de gomme laque dans l'alcool. — M. Quetelet a installé, à l'observatoire de Bruxelles, un appareil de ce genre, dont le fil, qui fait 2400 tours autour de l'aiguille, communique avec une longue tige de fer terminée par une houppe de fils de platine très fins. Quand l'électricité parcourt le fil de l'appareil, l'aiguille aimantée est déviée, et le sens de la déviation fait connaître la nature de l'électricité qui passe. Cet instrument est bien moins sensible que les électromètres à pendules.

M. Peltier a fait voir, par un moyen que nous ne pouvons décrire ici [1], qu'il faut, pour faire dévier de 1° l'aiguille d'un réomètre très sensible, plusieurs milliers de fois la quantité d'électricité statique qui suffirait pour produire la même déviation dans son électromètre (*fig.* 1032). Aussi, les réomètres restent-ils souvent stationnaires, pendant que les autres instruments signalent la présence de quantités notables d'électricité dans l'atmosphère.

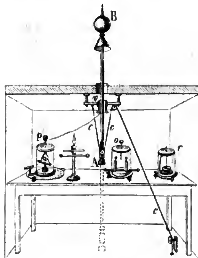


Fig. 1033.

On emploie enfin, pour étudier l'électricité atmosphérique, des cerfs-volants à pointe, ou des ballons captifs. Dans les observatoires, on a toujours plusieurs appareils, de sensibilité différente, prêts à être employés. Enfin, on peut disposer ces appareils de manière qu'ils enregistrent d'eux-mêmes leurs indications, au moyen de procédés photographiques.

Pour achever de donner une idée de la manière d'observer l'électricité atmosphérique, nous avons représenté (*fig.* 1033), la disposition des appareils établis par M. Palmieri, à l'observatoire du Vésuve [2]. Le conducteur à pointes AB traverse le toit de la chambre qui se trouve à la partie la plus élevée de l'édifice, et peut glisser dans un tube de verre *r*, parfaitement isolé. On peut le soulever au moyen d'un cordon de soie *c*, *c*, *c* qui passe sur une poulie de verre A, portée par un cylindre de verre; le conducteur peut être mis en communication avec l'électromètre de Peltier *p*, l'électroscope à feuilles d'or *o*, ou le réomètre *r*.

1402. Électricité de l'atmosphère par un temps serein — L'électricité de l'air, quand le ciel est pur, est toujours positive. Il s'ensuit que la surface du sol doit être constituée par influence, à l'état négatif, surtout sur les parties saillantes qu'elle peut présenter. La quantité d'électricité que contient l'air dépend de la hauteur, de l'heure et de la saison. Pour étudier les lois de ce phénomène, il faut que l'électromètre soit placé dans un endroit découvert; quand il est dominé par les objets terrestres, il ne donne aucun signe d'électricité. Ainsi, au fond des vallées étroites, sous les arbres, dans les rues, on ne trouve pas d'électricité; on en trouve un peu sur les quais, au milieu des

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LXVII, p. 440.
[2] *Bibl. de Genève* (Arch. des sc.), t. XXVII, p. 105.

places ; et sur les ponts, la quantité est souvent plus forte qu'en rase campagne. Il faut remarquer que les indications des électromètres sont dues à deux causes : l'action par influence exercée par l'électricité de l'air et par celle du sol, et la communication directe de l'électricité de l'air quand il est assez humide pour être conducteur. Quand le ciel est serein, et l'électromètre terminé par une boule, la première de ces causes agit seule, surtout si la tige de l'instrument est courte.

Variations avec la hauteur. — La quantité d'électricité de l'atmosphère augmente à mesure qu'on s'élève. Ce résultat a été constaté par de Saussure, Ermann, Volta, Becquerel sur le Saint-Bernard, Peltier au moyen du cerf-volant... Jusqu'à 1 mètre de hauteur au-dessus du sol, on ne trouve aucun signe d'électricité, parce que l'instrument est entièrement plongé dans une couche d'air qui partage l'électricité négative du sol. A partir de là, M. Quételet trouve, à Bruxelles, que l'intensité électrique est proportionnelle à la hauteur ; mais cette loi n'a été constatée que pour des élévations assez restreintes. Pour les hauteurs considérables, on ne sait que peu de chose ; Peltier a cependant reconnu, avec un cerf-volant, que l'électricité, qui croissait lentement jusqu'à 100 mètres, augmentait ensuite rapidement jusqu'à la hauteur de 247^m, la plus grande qu'il ait atteinte. Quelques légers cirrus suffisent, du reste, pour troubler la régularité du phénomène ; ainsi, Peltier trouva un jour, de l'électricité positive jusqu'à 50^m de hauteur, puis une zone neutre, et ensuite une zone négative de 20^m d'épaisseur environ, au-dessus de laquelle reparut l'électricité positive.

L'accroissement de l'électricité avec la hauteur peut servir à expliquer divers phénomènes. MM. Biot et Gay-Lussac, lors de leur voyage aérostatique, ayant laissé tomber de la nacelle, un fil métallique de 50 mètres de long terminé par une boule, trouvèrent le haut de ce fil électrisé négativement, quoique le temps fût serein. M. Biot a expliqué ce résultat en remarquant que la partie de l'atmosphère, supérieure à la nacelle, étant électrisée positivement, agissait par influence sur le fil, en attirant vers le haut le fluide négatif. Il est vrai que la partie de l'atmosphère située au-dessous de la boule agissait en sens inverse ; mais cette partie étant moins électrisée, l'effet de la première l'emportait.

Expérience d'Hermann. — Une expérience ancienne, faite par Hermann et de Saussure, s'explique par les mêmes principes [1]. Un électromètre surmonté d'une boule, est mis en communication avec le sol, puis isolé ; il ne donne aucun signe d'électricité. Mais si l'on vient à l'élever, de 40 à 50 centimètres, les feuilles d'or s'écartent aussitôt par de l'électricité positive ; si on le ramène au point de départ, les feuilles d'or reviennent au contact ; si enfin on l'abaisse, les feuilles divergent de nouveau, mais par de l'électricité négative, pour retomber encore si l'on ramène de nouveau l'instrument au point de départ.

[1] *Journal de physique* (1804), t. LIX, p. 99.

L'électromètre n'a donc reçu aucune électricité de l'air, puisqu'il n en conserve aucune trace quand il revient au point de départ. En ce point, et au moment où on l'a fait communiquer avec le sol, il s'est chargé d'électricité négative, par l'influence des couches supérieures de l'atmosphère, et cette électricité est restée dissimulée dans la boule de l'instrument. Quand ensuite on l'a élevé, c'est comme si on l'avait rapproché d'un corps électrisé, et une nouvelle décomposition de fluide neutre a repoussé dans les feuilles d'or du fluide positif. Quand, au contraire, on l'a abaissé, le fluide négatif, moins attiré dans la boule supérieure, s'est répandu en partie dans les feuilles d'or.

On obtient les mêmes effets en élevant ou abaissant une boule métallique fixée à l'extrémité d'un manche isolant et communiquant par un fil métallique avec le bouton de l'électromètre, qui reste en place. Peltier a reconnu qu'un abaissement produit toujours moins d'effet qu'une élévation égale. De plus, il faut beaucoup plus élever l'instrument, pour obtenir une certaine déviation, par un temps humide que par un temps sec et un ciel pur.

1403. Variations diurnes. — La tension de l'électricité de l'air en un même lieu et à la même hauteur, varie pendant la journée, et présente deux maximum et deux minimum, à des heures qui changent suivant les saisons. Cette loi, trouvée par Lemonnier, a été précisée par les observations de Beccaria et par celles que Schübler a faites à Tubingue, de mai 1811 à juin 1812. Arago l'a confirmée dans une série d'observations commencées en 1830, à l'Observatoire de Paris, et M. Quetelet dans celles qu'il poursuit à Bruxelles, depuis 1844. Voici les résultats moyens auxquels on est arrivé.

Du lever du soleil à 6 ou 7 heures du matin en été, à 10 ou 12^h en hiver, et à 8 ou 9^h dans les autres saisons, la tension électrique augmente et atteint son premier maximum. Elle diminue ensuite jusqu'à 3^h en été, et jusqu'à 1^h seulement en hiver, et atteint un minimum dans lequel la tension est à peu près la même qu'au lever du soleil. La tension augmente ensuite et atteint un second maximum vers 9^h du soir en été, et 6^h en hiver ; ce maximum est supérieur à celui du matin. Il y a enfin un second minimum pendant la nuit ; il a été trouvé, à Greenwich, à 2^h du matin ; Schübler l'avait fixé à 5 heures. — La moyenne de la journée coïncide sensiblement avec la tension observée à 11^h du matin.

M. Birt a fait, à Kew, pendant 5 années consécutives, plus de 1500 observations ; d'où il a conclu, pour résultat moyen, que les deux maximum tombent à 10^h du matin et à 10^h du soir, et les deux minimum à 2^h du matin et à 4^h du soir. M. Birt n'a pas tenu compte de l'état du ciel, de sorte que certaines observations, ($\frac{1}{20}$ environ), ont donné de l'électricité négative.

Remarquons enfin que les différences entre le maximum et le minimum sont plus prononcées pendant l'été que pendant l'hiver, et dans les temps sereins que dans les temps couverts.

1404. Variations mensuelles. — Les variations de l'électricité de l'air

avec les saisons sont suivies attentivement à Bruxelles par M. Quételet, depuis 1844, au moyen de l'électromètre de Peltier [1]. Les observations sont faites chaque jour, à midi, et l'on fait chaque mois la somme des nombres de degrés observés pendant le mois. La *fig.* 1034 fait connaître les résultats ainsi obtenus pendant 6 ans; les ordonnées sont proportionnelles aux sommes correspondantes aux différents mois, à l'échelle de 2 millimètres par unité. On voit que la quantité d'électricité est bien plus grande en hiver qu'en été; le maximum a lieu en *janvier*, et le minimum en *juin ;* le premier est à peu près 13 fois plus grand que le second. Ce rapport n'est pas partout aussi fort; il est plus petit à Kew, d'après les observations de M. Ronalds, et encore moindre à Munich, d'après celles de M. Lamon. Si, au lieu de la courbe des moyennes mensuelles électriques, on voulait construire celle des maximum ou des minimum des différents mois, on trouverait sensiblement la même ligne. La moyenne de ces termes extrêmes pour chaque mois, coïncide aussi avec la moyenne du mois. Enfin, les moyennes des mois de mars et de novembre coïncident sensiblement avec la moyenne de l'année.

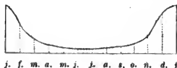


Fig. 1034.

Les quantités d'électricité, par les temps sereins, varient avec la latitude; mais on n'a que peu de renseignements à cet égard. D'après Scoresby, l'électricité de l'air est nulle au-dessus des mers polaires.

1405. ÉLECTRICITÉ PAR LES TEMPS COUVERTS. — Quand le temps est couvert, l'état électrique est généralement très variable et très irrégulier; aussi, quand on veut rassembler des résultats comparables faut-il, ce qui n'a pas toujours été fait, ne considérer que les observations faites dans les temps sereins.

M. Quételet a trouvé, à Bruxelles, que l'électricité, quand le ciel est nébuleux, est généralement en plus faible quantité que par un ciel serein, et cela est d'autant plus sensible qu'on se rapproche davantage du mois de janvier, pendant lequel l'électricité des temps couverts n'est que $\frac{1}{4}$ de celle des temps sereins.

Sous un ciel nuageux, les électromètres varient fréquemment et indiquent souvent en peu de temps des changements dans l'intensité et dans la nature de l'électricité. Peltier, en juillet 1842, sur le Faulhorn, a vu que les nuages blancs qui passaient au-dessus de lui étaient fortement chargés d'électricité positive et donnaient de la neige, tandis que les nuages gris étaient prodigieusement chargés de fluide négatif, et donnaient du grésil. Il a aussi reconnu, par les signes électriques indiqués soit par le cerf-volant, soit par l'électromètre, que les vapeurs transparentes que contient l'atmosphère sont souvent

[1] *Annuaire météorologique*, année 1850.

groupées comme de grands *nuages invisibles*, moins divisés que les nuages opaques. Cet arrangement des vapeurs doit avoir une grande influence sur certains phénomènes météorologiques.

Par les temps d'orages, les électromètres sont continuellement en mouvement et indiquent des quantités énormes d'électricité, changeant de nature d'un instant à l'autre. Ce n'est qu'après un éclair que ces instruments restent quelques instants en repos, pour s'agiter ensuite de nouveau; attestant ainsi le mouvement électrique qui se fait dans l'intérieur des nuages (1385).

Par les brouillards, l'électricité de l'air est augmentée, probablement parce que les vapeurs en s'abaissant, apportent dans les régions inférieures de l'atmosphère l'électricité qu'elles ont amassée dans les couches supérieures. D'après Schübler, cette électricité, ordinairement positive, est plus prononcée en hiver qu'en été. Le dépôt de la rosée est aussi accompagné d'un accroissement notable dans l'électricité de l'air.

Pendant la pluie et la neige, on trouve une forte électricité dans les couches inférieures de l'air, si ce n'est pendant les pluies fines et continues. Cette électricité est tantôt positive et tantôt négative; en Allemagne, le second cas est un peu plus fréquent que le premier. A Bruxelles, M. Quételet n'a vu que 23 fois en 4 ans, l'électricité de l'air négative, et ce phénomène suivait ou précédait en général des pluies ou des orages. Six fois seulement la pluie a été négative, tandis que, pendant le même espace de temps, il a observé 24 pluies positives; résultat bien différent de celui qui a été constaté en Allemagne. La direction du vent qui règne pendant la pluie influe notablement sur les résultats. Ainsi, Schübler et Hemmer trouvent, dans deux localités différentes que, en Allemagne, les pluies négatives sont plus fréquentes avec les vents du sud qu'avec les vents du nord; trois fois plus d'après les observations de Schübler, et deux fois plus d'après celles de Hemmer.

Pour expliquer ces pluies négatives, Schübler, Volta, Halles..... pensaient que l'évaporation des gouttes de pluie produisait de l'électricité; le fluide positif étant emporté par la vapeur, les gouttes restaient électrisées négativement. A l'appui de cette explication, on citait les cascades, qui forment un brouillard dont les gouttelettes sont électrisées négativement. Mais ce dernier résultat doit s'expliquer par l'influence de l'électricité positive des parties élevées de l'atmosphère, comme le prouvent les expériences de M. Belli, qui isola une fontaine de Héron et vit que, par un temps serein, le jet était négatif et le vase positif; tandis qu'il ne trouvait aucun signe d'électricité quand l'atmosphère n'en contenait pas. M. Belli attribue l'électricité négative de la pluie, à l'action par influence exercée sur elle par le nuage positif qui la verse, quand elle est assez rapprochée du sol pour que son fluide positif repoussé puisse s'y transporter à travers l'air humide.

1406. Relation entre l'humidité de l'air et son état électrique. — M. Quételet a remarqué qu'il existe une relation importante entre les

variations de l'électricité de l'atmosphère et celles de l'humidité qu'il contient[1]. Considérons d'abord les *variations diurnes* par un temps serein. Avant le lever du soleil, l'air très humide laisse couler dans le sol l'électricité qu'il contient; après le lever du soleil, les vapeurs montent, et l'électricité atteint son maximum. Plus tard, le sol s'échauffant, de nouvelles vapeurs se forment, à travers lesquelles l'électricité de l'air passe dans le sol. L'action solaire fait ensuite monter ces nouvelles vapeurs, et l'on observe un second maximum; après lequel l'électricité diminue en même temps que les vapeurs s'abaissent.

Quant aux variations mensuelles de l'électricité, voici comment M. Quételet résume les résultats :

Mois les plus froids.	maximum..	*d'électricité*, humidité ordinaire..	ciel serein.
	minimum..		ciel couvert.
	maximum..	*d'humidité*, beaucoup d'électricité	un peu de brouillard.
	minimum..		ciel serein.
Mois chauds et tempérés.	maximum..	*d'électricité*, peu d'humidité....	temps sec, nuages.
	minimum..		temps sec, ciel serein.
	maximum..	*d'humidité*, peu d'électricité....	temps humide et couvert.
	minimum..		temps très sec, ciel serein.

On peut donc déduire avec une grande probabilité l'état électrique, de l'aspect du ciel et de l'observation de l'hygromètre.

1407. DE L'ORIGINE DE L'ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE. — Volta, Laplace et Lavoisier, dans des expériences célèbres sur lesquelles nous aurons à revenir, ont trouvé que la vaporisation de l'eau dans un creuset très chaud, produisait de l'électricité. Plus tard, M. Pouillet a précisé les conditions du phénomène, et a montré qu'il n'y a dégagement d'électricité qu'autant que l'eau tient en dissolution quelques substances dont la vapeur produite doit se séparer. Quand ces substances sont des sels, la vapeur emporte l'électricité positive, et le vase prend l'électricité négative. M. Pouillet a fait voir, de plus, que l'acte de la végétation est aussi accompagné d'un dégagement d'électricité. Voilà donc deux sources d'électricité pour l'atmosphère : la végétation, et l'évaporation qui se fait constamment à la surface des mers, des terrains humides et même des eaux douces, qui ne sont jamais pures.

Cette origine de l'électricité de l'air a été adoptée d'abord sans contestation; mais depuis quelque temps, elle a été attaquée assez vivement par divers physiciens. M. Guthrie a fait remarquer que c'est pendant l'hiver que l'air est le plus fortement électrisé, et c'est l'époque de l'année où l'évaporation et la végétation ont le moins d'activité. A quoi l'on a répondu que, pendant l'hiver, l'électricité des hautes régions arrivait plus facilement dans les parties basses, où l'on observe; mais nous avons vu que la conductibilité de l'air dépend, non de son état hygrométrique, mais du poids absolu de vapeur qu'il contient

[1] *Sur le climat de la Belgique, et bibl. de Genève* (Arch. des sc.), t. XXVI, p. 5.

(1344); or, ce poids est moindre en hiver qu'en été. Peltier remarque aussi que c'est au moment de la journée où l'évaporation est la plus active, que se présente le premier minimum diurne. Le même observateur ayant repris les expériences de M. Pouillet a trouvé que l'électricité ne se montre, lors de la formation de la vapeur dans un creuset brûlant dans lequel l'eau prend la forme globulaire, qu'au moment où elle se produit brusquement, de manière que l'électricité qu'elle emporte soit immédiatement soustraite à l'attraction de cello que garde le creuset; or, ce n'est pas dans ces conditions que l'évaporation se fait dans la nature. On peut répondre à ces expériences par celles de M. Matteucci. Ayant isolé une plaque de métal de 33 décimètres carrés, recouverte de terre mouillée avec de l'eau salée, il l'exposa aux rayons solaires après l'avoir mise en communication avec le bouton d'un électromètre; les feuilles d'or s'écartèrent par de l'électricité négative. S'il agitait l'air au-dessus de la plaque, les résultats étaient encore plus marqués, l'agitation activant l'évaporation et entraînant la vapeur formée, de manière à empêcher les électricités séparées de se recombiner. M. Matteucci a opéré avec différentes espèces de terres et divers sels. Les vapeurs qui se forment à la surface de la terre emportent donc dans l'atmosphère de grandes quantités d'électricité. Il résulte aussi de là que le sol doit recevoir continuellement de l'électricité négative, qui est retenue à sa surface par l'attraction de l'électricité de l'air, et s'accumule dans les objets élevés, les arbres, les montagnes. Cet état négatif du sol augmente par la décomposition par influence que produit l'électricité de l'air (1402); il sert à expliquer l'ascension des nuages négatifs, l'abaissement des nuages positifs, et leur station autour des pics élevés, où ils sont retenus assez fortement pour résister à des vents assez violents. Nous avons vu comment ce dernier phénomène peut être produit par une cause toute différente (1174).

M. Becquerel ne pense pas que l'évaporation suffise pour fournir les quantités énormes d'électricité que contient l'air. Quant à la végétation, remarquant que les phénomènes chimiques qui se passent à la surface des parties vertes, sous l'influence du soleil, sont inverses de ceux qui ont lieu pendant la nuit, il regarde comme très probable que les plantes émettent pendant le jour de l'électricité négative, et pendant la nuit de l'électricité positive [1].

Peltier, auquel sont dûs tant de travaux sur la météorologie électrique, a donné une explication toute nouvelle de l'état électrique de l'atmosphère [2]. Suivant lui, l'air, par les temps sereins, ne contient pas d'électricité positive, et si les instruments en indiquent, cela vient d'une décomposition par influence produite par l'électricité de la terre, qui est naturellement chargée de fluide négatif. Les vapeurs qui s'élèvent du sol emportent de cette électricité, et forment une couche négative dans laquelle les électromètres restent en repos,

[1] *Traité de l'électricité et du magnétisme*, t. IV, p. 405.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. IV, p. 385.

parce qu'ils y sont entièrement plongés. Si on les éloigne du sol, on les fait sortir de cette couche de vapeur, et les feuilles d'or indiquent du fluide positif provenant d'une décomposition par influence exercée par l'électricité négative qui se trouve au-dessous de l'instrument. Si l'on abaisse ce dernier, il s'y produit un effet inverse.

Il est incontestable que le sol est chargé d'électricité négative; mais, tandis que l'on a toujours regardé cette électricité comme la conséquence de celle qui existe dans l'atmosphère, Peltier admet, au contraire, que le fluide négatif du sol lui appartient naturellement et que l'atmosphère ne contient que le fluide négatif que les vapeurs y transportent. Dans cette manière d'interpréter les phénomènes, il n'y a plus à se préoccuper de l'origine de l'électricité positive de l'air, puisqu'il n'en contiendrait pas. Mais il faut alors rechercher l'origine de l'électricité négative de la terre; la difficulté n'est donc que déplacée. Du reste, la théorie de Peltier n'est pas établie sur des bases assez certaines pour faire admettre que l'électricité positive que l'on trouve dans l'air, par les temps sereins, n'est que le résultat d'une illusion.

M. Delarive avait d'abord cherché à rattacher l'électricité atmosphérique à la distribution de la chaleur dans l'air; mais il a abandonné plus tard cette opinion, et il penche à admettre une électricité propre du globe, produite par les actions chimiques qui s'exercent à la surface interne de la croûte solide. Celle-ci garderait le fluide négatif, et le fluide positif, repoussé à la surface extérieure, serait transporté dans l'atmosphère par les vapeurs qui se forment à la surface [1].

On voit que l'origine de l'électricité atmosphérique, comme celle de l'électricité des nuages orageux, est encore un mystère pour la science.

V. Aurores polaires.

1408. Les *aurores polaires*, connues aussi sous le nom d'*aurores boréales* ou d'*aurores australes*, suivant qu'elles se montrent au pôle nord ou au pôle sud, sont des phénomènes lumineux très brillants, dont la nature électrique et la relation avec le magnétisme terrestre sont incontestables. Ce majestueux météore présente des aspects très variés; il suit une marche assez constante; il naît, se développe, et passe successivement, avant de disparaître, par une série de phases plus ou moins brillantes.

DESCRIPTION DE L'AURORE POLAIRE. — Plusieurs heures avant l'apparition du météore, l'agitation de l'aiguille aimantée indique une perturbation dans l'équilibre magnétique du globe. Cette agitation ne fait qu'augmenter, comme nous l'avons vu (1255), pendant les différentes phases du phénomène; et

[1] *Traité d'électricité théorique et appliquée*, par M. A. de La Rive, t. III, p. 191.

l'action magnétique qui la produit est quelquefois assez intense pour empêcher les télégraphes électriques de fonctionner régulièrement. Au moment où l'aurore boréale va se montrer, et dans la direction du méridien magnétique, on voit d'abord l'air se rembrunir et former un segment circulaire obscur d'une teinte brune ou violacée, derrière lequel les étoiles apparaissent comme à travers un brouillard. Ce segment, d'autant moins apparent que la latitude du lieu d'observation est plus élevée, paraît bientôt bordé d'un arc lumineux dont les extrémités s'appuient sur l'horizon. Cet arc augmente d'épaisseur et d'éclat; quelquefois il est composé de parties séparées. Le point le plus élevé est à peu près dans le méridien magnétique; il s'en écarte ordinairement de 5 à 18° dans le sens de la déclinaison du lieu d'observation, et d'autant plus

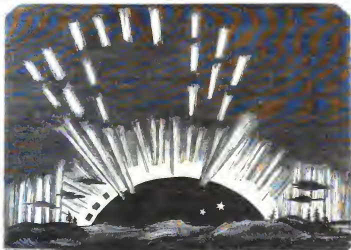


Fig. 1035.

que ce lieu est plus rapproché du pôle. L'éclat de l'arc est souvent comparable à celui de la pleine lune, et quelquefois visible en plein jour. La nuance est variable; elle présente souvent des teintes rouges, bleuâtres, violacées. Du reste, il paraît que des observateurs éloignés voient un arc particulier, qui dépend de leur position.

Rayons. — L'arc lumineux est souvent agité pendant des heures entières par une sorte d'effervescence et par des ondulations continuelles; puis on y distingue des stries rayonnantes, il semble mordre sur le segment obscur en certains points, d'où s'élancent normalement des bandes brillantes, ou *rayons*, plus vives au milieu que sur les bords, et se détachant nettement sur le ciel (*fig.* 1035). Ces rayons montent avec une vitesse plus ou moins rapide, comparable à celle des fusées d'artifice. Ils se brisent, se multiplient, dépassent le

zénith, et finissent par envahir toute la voûte céleste en formant une coupole de feu, mobile comme les flots de la mer, et dont tous les éléments convergent vers un point situé sur le prolongement de l'aiguille d'inclinaison, en formant ce qu'on nomme la *couronne*. La formation de la couronne annonce la fin du phénomène : les arcs perdent leur éclat, les rayons s'affaiblissent, et tout finit par disparaître.

C'est surtout dans les zones glaciales que les aurores polaires se montrent avec toute leur magnificence. On y voit souvent l'arc lumineux monter avec plus ou moins de rapidité, tout en dardant ses rayons, et en conservant quelquefois les mêmes points de réunion avec l'horizon. Cet arc peut être suivi de plusieurs autres, qui naissent successivement, et sont séparés par des bandes sombres. Cependant le premier arc finit par dépasser le zénith, il se sépare quelquefois alors de l'horizon, et apparaît comme un immense ruban strié dans le sens transversal, et dardant des rayons vers le bas; car le ruban se trouvant alors au sud de l'observateur, le côté par où ces rayons s'élancent paraît en bas; de même que si nous passons sous un ruban horizontal garni d'une frange, qui nous paraissait d'abord au-dessus du bord uni, elle nous paraîtra au-dessous, si nous nous retournons de manière à toujours la voir. La bande lumineuse est animée de mouvements d'ondulation, comme un serpent qui se replie, ou comme une longue draperie agitée par le vent; elle forme les courbes les plus gracieuses, présentant quelquefois des contours fermés.

La voûte lumineuse, constituée par la couronne, quand il s'en forme une, est un effet d'illusion d'optique. Wilke a prouvé que tous les rayons sont parallèles à l'aiguille d'inclinaison, et que c'est par un effet de perspective qu'ils semblent diverger en partant de l'arc, et converger ensuite vers le centre de la couronne; de même que lorsqu'on est au milieu d'un tunnel, ses arêtes paraissent converger vers les centres des deux ouvertures. M. Morlet regarde l'arc auroral comme composé de rayons très serrés ou superposés; en effet, quand cet arc passe au zénith, on le voit souvent coupé en ce point par un large espace obscur. On a vu quelquefois des rayons ou des bandes noires s'élever du segment obscur, et passer sur l'arc et le reste de l'aurore. D'après M. Hansteen, ces rayons sont aussi parallèles à l'aiguille d'inclinaison.

Les aurores polaires ne se présentent pas toujours avec toutes les phases que nous venons de décrire. Souvent elles ne consistent qu'en une lueur diffuse semblable à celle qui se montre à l'orient avant le lever du soleil. D'autres fois, il n'y a qu'un simple arc lumineux bordant le segment obscur et dardant à peine quelques rares rayons. Les plus belles aurores polaires perdent beaucoup à être vues dans les basses latitudes, ou plutôt à mesure qu'on s'éloigne du pôle magnétique; alors on n'aperçoit que les extrémités des rayons, et la couronne, quand il s'en forme une. Les aurores boréales se voient rarement en Italie, tandis qu'en Amérique, à la même latitude, on en voit fréquemment, à cause de la proximité du pôle magnétique (1238).

Etendue et hauteur des aurores polaires. — L'étendue qu'occupe le

météore est quelquefois immense : le capitaine Lafond, étant dans l'hémisphère austral à la latitude de 45° et sous le méridien qui passe par le milieu de la Nouvelle-Hollande, a pu voir, le 14 juin 1831, une aurore boréale, dans la direction du *nord-est*. Dalton a observé plusieurs fois des aurores *australes* en Angleterre. Cependant, la hauteur des aurores polaires a été d'abord fort exagérée ; les anciens physiciens la portaient bien au-delà des limites de l'atmosphère. Depuis, ayant remarqué que le météore est entraîné dans le mouvement de la terre, ils ont admis qu'il avait lieu dans les régions supérieures de l'atmosphère. La hauteur de l'arc est très variable, et peut être assez petite, car on l'a vu se projeter sur des nuages et même sur des montagnes. Enfin, Parry dit avoir vu un rayon auroral frapper la terre à une petite distance de lui.

Du bruit de l'aurore polaire. — On admet généralement que, dans les hautes latitudes, l'aurore polaire est accompagnée d'un bruissement particulier, augmentant d'intensité quand les rayons s'élancent avec vivacité, et analogue à celui que produisent les aigrettes électriques. L'opinion des habitants des régions boréales est unanime à cet égard. Cependant bien des voyageurs n'ont pu entendre ce bruit. Il en a été ainsi des membres de la Commission scientifique du Nord, qui ont observé, à Bosekop, 153 aurores boréales. De plus, il résulte d'une espèce d'enquête qu'ils ont faite dans le pays, que le bruit entendu était produit soit par le vent, soit par la crépitation de la neige ; et ils ont fini même par faire partager cette opinion aux habitants.

1109. DE L'EXPLICATION DES AURORES POLAIRES. — Les aurores boréales étaient connues des anciens. Aristote et Sénèque les ont observées en philosophes, ce qui n'a pas empêché Pline d'y voir plus tard des présages funestes. Depuis, ce brillant météore n'a été qu'un sujet d'épouvante, principalement pour les populations ignorantes et superstitieuses du moyen-âge. La frayeur et l'imagination y faisaient voir des torches, des épées sanglantes, des têtes hideuses avec les cheveux hérissés. Au commencement du XVIIe siècle, les préjugés et l'ignorance commencèrent à reculer devant les lumières de la science ; et tandis que l'historien Legrain parle encore, en 1615, d'une apparition effroyable d'hommes de feu combattant avec des lances, Lamote Levoyer, témoin du même phénomène, le réfute et ramène les choses à leur juste valeur. Gassendi est un des premiers qui aient envisagé le météore en observateur éclairé, et c'est de lui qu'il a reçu le nom d'*aurore boréale*. A partir de cette époque, on s'est occupé d'en étudier toutes les circonstances et d'en chercher l'explication. Il faudrait des volumes pour analyser tous les systèmes qui ont été proposés. D'abord, on eut recours à des exhalaisons s'élevant de la terre dans les régions polaires, et fermentant en dégageant de la lumière ; Muschenbroeck les suppose arrangées en nuées produisant de la lumière par leur rencontre ; et Lemonnier les compare à la matière de la queue des comètes. Euler suppose que les particules de l'air sont lancées par l'impulsion des rayons solaires, à une immense hauteur où elles deviennent lumineuses. D'autres ont fait intervenir la réflexion

des rayons solaires sur les glaces polaires, puis sur des parcelles de glace en suspension dans l'air; d'autres ont simplement supposé une réfraction dans ces parcelles prismatiques. Halley a imaginé un courant de fluide magnétique s'échappant de l'intérieur de la terre par le pôle boréal. De Mairan, dans son *Traité de l'aurore boréale*, l'a attribuée à une vapeur lumineuse enveloppant le soleil et venant jusqu'à la terre, qui en emportait une portion avec elle. Cette théorie, présentée avec beaucoup d'habileté, eut un grand succès et fut généralement admise jusqu'à l'année 1740, époque à laquelle Celsius et Hiorter découvrirent l'influence des aurores boréales sur l'aiguille aimantée, influence démontrée ensuite par Arago. Eberhart à Hall, et Paul Frisi à Pise, supposèrent alors, en comparant la lumière du météore à celle de l'électricité dans le vide, que le fluide électrique jouait un rôle dans le phénoméne, et c'était déjà là un grand pas de fait. Cette opinion fut adoptée par Canton, Beccaria, Wilke. Franklin, puis Dalton et Bertholon, ébauchèrent ensuite des théories de l'aurore boréale basées sur la présence de l'électricité dans l'atmosphére. Cependant Volta avança, mais comme une simple conjecture, que le météore était produit par l'inflammation du gaz des marais, que l'on venait alors de découvrir. M. Biot, qui a observé des aurores boréales aux îles Schetland, les explique par des nuages de particules ferrugineuses d'une ténuité extrême, qu'il suppose lancées par les volcans trés actifs des régions polaires, et servant de conducteur à l'électricité de l'air, qui s'y propagerait en illuminant sa route. Mais, comme le fait remarquer M. Becquerel, la substance des poussiéres volcaniques conduit fort mal l'électricité. Suivant de Humboldt, l'aurore polaire est la résolution de l'orage magnétique qui cause l'agitation de l'aiguille aimantée ; ce qui n'explique pas le phénoméne, et ne fait que donner une indication lointaine de sa cause premiére.

M. Morlet énonce qu'il existe dans les hautes régions de l'air un fluide lumineux, qu'il attribue à l'électricité atmosphérique devenue lumineuse en se déplaçant dans l'air très raréfié, et repoussée par le magnétisme terrestre. Il explique l'arc auroral par la réflexion de la lumière électrique sur les facettes des particules de glace prismatiques ou pyramidales, dont les axes se trouvent convenablement orientés[1].

1410. Théorie de l'aurore polaire. — Pour établir une théorie de l'aurore polaire, il faut expliquer l'accumulation de grandes quantités d'électricité au haut de l'atmosphére des régions glaciales; faire voir comment cette électricité produit les effets lumineux qui constituent le météore, et enfin montrer comment elle peut agir sur l'aiguille aimantée.

Peltier explique de la maniére suivante la grande quantité d'électricité accumulée dans l'atmosphére des régions polaires[2]. Les vapeurs qui s'élévent

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXVII, p. 65.

[2] *Archives de l'électricité*, t. IV, p. 210.

entre les tropiques avec l'air dilaté, s'écoulent vers les pôles, à une certaine hauteur, emportant avec elles toute l'électricité qu'elles contiennent. A mesure qu'elles s'avancent, elles forment des nuages, et, plus près des pôles, se condensent en particules glacées. Le courant supérieur coupe des cercles parallèles de grandeur décroissante, et la portion d'électricité non perdue en route, se trouvant resserrée dans un espace de plus en plus petit, finit par acquérir une tension considérable; l'électricité produit alors des décharges lumineuses entre les particules de glace, et d'autant plus facilement que cela se passe dans un air très raréfié. Ces décharges, qui ont lieu circulairement autour du pôle, forment l'aurore polaire.

M. A. de La Rive a formulé d'une manière plus précise et plus complète une explication analogue [1]. L'électricité positive des hautes régions de l'atmosphère intertropicale se rend vers les pôles en augmentant de tension, et va se joindre par l'intermédiaire des particules glacées qui flottent dans l'air, au fluide négatif de la terre, puis forme dans le sol un courant dirigé du pôle à l'équateur. Ce courant agit sur l'aiguille aimantée, et son intensité, variant avec la distribution de la chaleur dans la colonne atmosphérique (1321), il produit les variations diurnes, comme nous le verrons plus tard. Quand il y a une grande accumulation de particules glacées, on aperçoit un nuage sombre, qui n'est autre chose que le segment obscur; puis des décharges lumineuses qui forment les rayons auroraux. Alors l'aiguille aimantée est agitée par ces décharges, pendant lesquelles le courant terrestre éprouve nécessairement des variations brusques d'intensité, en donnant lieu à ce qu'on a appelé un *orage magnétique*. Les particules glacées sont surtout abondantes quand le soleil se trouve dans l'hémisphère opposé au pôle considéré; aussi a-t-on remarqué que c'est principalement dans la saison froide, que les aurores polaires sont fréquentes; elles se produisent alors presque tous les jours, et remplacent, par la clarté qu'elles répandent, la lumière absente du soleil. A l'appui de cette explication, nous ajouterons que Wrangel a vu des cercles lumineux autour de la lune quand les rayons auroraux s'élançaient dans sa direction, et nous verrons, dans l'optique, que ces cercles supposent l'existence de particules de glace. D'autres fois, on a vu des cirrus nombreux aux endroits où des lueurs aurorales avaient apparu, et même on les a vu se grouper comme les rayons d'une aurore polaire.

Enfin, pour expliquer la forme de l'aurore polaire et sa relation de position avec le pôle magnétique de la terre, M. A. de La Rive fait l'expérience qui suit [2]. Il prend un ballon à deux tubulures; l'une est munie d'un robinet *r* (*fig.* 1036), par lequel on peut extraire l'air; l'autre *a* laisse passer un cylindre en fer doux *f*, dont une des bases arrive au centre du ballon, tandis

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXV, p. 310.

[2] *Ann. de ch. et de ph.*, 3e série, t. XXV, p. 318, et *Bibl. de Genève* (Arch. des sc.), t. XXIV, p. 337.

que l'autre, *o*, sort de 3 ou 4 centimètres en dehors. Ce cylindre, couvert d'une couche épaisse de gomme laque, excepté sur ses bases, est entouré d'un anneau en cuivre qui en est séparé par la gomme laque, et se trouve tout près de la tubulure, en dedans du ballon. Une tige métallique *t*, fixée à l'anneau, et isolée du cylindre de fer, traverse la tubulure et sort au dehors. Si, après avoir extrait l'air du ballon, on fait communiquer cette tige avec une machine électrique et le cylindre de fer avec le sol, on voit une gerbe lumineuse irrégulière qui va de l'extrémité du cylindre à l'anneau. Mais si le fer doux est aimanté par l'influence d'un fort aimant qu'on en approche très près en *o*, la lumière électrique jaillit seulement du contour de la base du cylindre de fer, en formant un cercle lumineux d'où partent des jets qui tournent autour du cylindre, soit dans un sens, soit dans l'autre, suivant le sens de l'aimantation et la direction que suit le fluide positif.

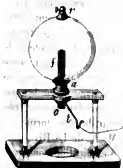


Fig. 1036.

Ces résultats peuvent servir à faire concevoir la forme qu'affecte la lumière de l'aurore polaire, et la position de ses rayons par rapport au pôle magnétique du globe et à la direction de l'aiguille d'inclinaison. On peut donc dire aujourd'hui que la science est sur la voie de l'explication, au moins dans son ensemble, du phénomène de l'aurore polaire.

CHAPITRE III.

DES SOURCES D'ÉLECTRICITÉ. — PILES.

> Cette pile..... est quant à la singularité des effets, le plus merveilleux instrument que les hommes aient jamais inventé, sans en excepter le télescope et la machine à vapeur.
>
> ARAGO, *Éloge de Volta.*

1414. Dans ce chapitre, nous allons passer en revue les *différentes sources d'électricité.* On peut produire du fluide électrique par six moyens différents, qui sont : 1° les actions mécaniques, comme le frottement, la pression...; 2° les actions chimiques; 3° la chaleur, agissant soit dans les cristaux, soit dans les corps à structure amorphe; 4° les phénomènes vitaux qui s'accomplissent dans les êtres organisés; 5° on peut encore produire de l'électricité par *induction*, au moyen des aimants; mais nous ne parlerons de cette

dernière source, que dans le chapitre où nous traiterons de l'*induction électromagnétique*.

On a admis pendant longtemps que le *contact seul* de deux métaux différents suffisait aussi pour développer de l'électricité. Nous discuterons cette hypothèse en parlant du dégagement de l'électricité dans les actions chimiques, auxquelles on attribue généralement la petite quantité de fluide que l'on observe quand on met les corps en contact.

Il résulte de l'énumération qui précède, que lorsqu'on ébranle les molécules des corps et qu'on change leur état d'équilibre, il se dégage de l'électricité. Nous avons déjà fait une remarque semblable à propos des sources de chaleur (II,1031); seulement, ici, nous ne trouvons pas de manifestation électrique dans le changement d'état des corps, ce qui tient peut-être à la recomposition immédiate des deux fluides, qui se seraient séparés au premier moment.

Une semblable recomposition doit avoir lieu dans la plupart des cas où il se produit de l'électricité, de sorte que nous ne recueillons qu'une faible partie de celle qui se dégage. Cette recomposition produit, dans beaucoup de cas, des lueurs assez vives, dont nous avons cité plusieurs exemples (1261). On cherche habituellement à préserver de cette recomposition immédiate la plus grande partie possible des fluides séparés. Mieux on réussit et plus la tension obtenue est grande. Tout ce qui augmente la rapidité du dégagement de l'électricité élève aussi la tension, jusqu'à ce que la quantité recomposée soit égale à celle qui prend naissance pendant le même temps.

§ 1. — SOURCES MÉCANIQUES D'ÉLECTRICITÉ.

I. Lois du dégagement de l'électricité par le frottement.

1412. Nous avons vu comment l'électricité et ses principales propriétés ont été découvertes au moyen du frottement; et nous avons montré que l'un des fluides se porte sur le corps frottant, et l'autre sur le corps frotté. Nous avons étudié les causes qui modifient, chez les corps mauvais conducteurs, la tendance d'une même substance à prendre de préférence l'une ou l'autre électricité (1264). Parmi ces causes figure d'abord la chaleur et l'état de division, qui donnent aux corps une tendance à prendre le fluide *négatif;* puis l'énergie de l'ébranlement moléculaire, qui augmente aussi cette tendance, soit que ce résultat dépende de l'ébranlement en lui-même, soit de la chaleur qui en est la conséquence.

M. E. Becquerel a reconnu que l'état moléculaire des corps a une plus grande influence sur le dégagement d'électricité que la substance même de ces corps. Ainsi, le talc, la farine, le charbon de cornue en poudre impalpable appliqués sur les coussins d'une machine de Nairne, donnent des résultats qui

approchent de ceux de l'or musif et des amalgames. La quantité d'électricité donnée était déduite approximativement de la distance explosive de deux boules communiquant avec les conducteurs positif et négatif, la machine tournant avec une vitesse constante.

On peut aussi dire que, en général, quand les surfaces frottées sont humides, on ne recueille pas d'électricité; ce qui provient peut-être de ce que les fluides qui se séparent se recombinent aussitôt, par l'intermédiaire de la couche d'humidité qui réunit les deux corps. Quand les surfaces sont bien sèches, le moindre frottement fait apparaître l'électricité. Le papier humide, que l'on frotte sur un métal poli, ne donne aucune électricité; mais s'il est bien sec, il s'électrise positivement. Dans les fabriques de papier continu, il se produit souvent des étincelles électriques provenant du frottement de la bande de papier sur les cylindres chauds destinés à la sécher.

Après avoir rappelé ces généralités, il nous reste à étudier les circonstances du dégagement de l'électricité par le frottement sur les corps bons conducteurs, et à étudier l'influence que peut avoir sur ce dégagement la pression des corps en présence, leur vitesse tangentielle relative, et la nature du frottement.

1413. Électricité dans le frottement des métaux par les mauvais conducteurs. — Les métaux frottés avec des conducteurs imparfaits, comme le bois, le liége, l'ivoire, le soufre même et la gomme laque, prennent l'électricité négative. Cavallo, Wilson, Haüy avaient déjà constaté ce résultat sur plusieurs métaux ; mais il s'était présenté des anomalies, particulièrement avec ceux qui sont facilement oxydables, comme le plomb, le bismuth, qui prennent assez souvent le fluide positif. M. A. de La Rive a expliqué ces anomalies, en remarquant que l'électricité est toujours négative quand la surface métallique est bien décapée [1]. Mais si cette surface est ternie par une mince couche d'oxyde, le corps frottant enlève et retient l'oxyde, qui devient alors la substance frottante, et qui ayant une grande tendance à prendre le fluide négatif, laisse au métal le fluide positif. Le liége, le caoutchouc, et généralement les corps mous qui enlèvent facilement la couche d'oxyde, produisent surtout cet effet. Si le métal oxydable a été chauffé, il est oxydé plus fortement, et prend certainement l'électricité positive. Quand la couche d'oxyde est trop épaisse pour être entièrement enlevée par le frottoir, le frottement s'exerçant sur cette couche, le métal s'électrise négativement, ou bien il ne s'électrise pas du tout, les deux surfaces en présence étant de même nature.

Ces expériences ont été faites avec un électroscope à feuilles d'or, avec ou sans condensateur. La lame métallique était tenue par un manche isolant et mise en communication avec l'électromètre En passant délicatement le bout du doigt bien sec sur la lame métallique bien décapée, on obtenait facilement de l'électricité négative sur cette lame.

1414. Frottement des métaux entre eux. — Quand on frotte deux

[1] *Bibliothèque universelle de Genève* (Sciences et arts), 1835, t. LIX, p. 13.

corps bons conducteurs, les électricités se recombinent immédiatement, si l'on n'emploie pas des précautions spéciales. M. Becquerel est parvenu à constater l'électricité dégagée dans le frottement des métaux, par le moyen qui suit[1] : Deux lames métalliques sont soudées aux extrémités du fil d'un réomètre multiplicateur. La soudure de chaque plaque est enchâssée dans du liége mastiqué avec la plaque, de manière à arrêter la chaleur des mains. Si l'on applique les deux lames l'une sur l'autre, l'aiguille du réomètre reste en repos; mais dès qu'on les fait glisser l'une sur l'autre, l'aiguille est déviée; c'est que le frottement décompose l'électricité neutre, chacun des fluides séparés se porte sur une des lames, une partie est aussitôt détruite aux surfaces en contact, mais une petite portion se combine à travers le fil du réomètre, et fait dévier l'aiguille aimantée. La déviation est d'autant plus grande que le glissement est plus rapide, une moins grande partie des fluides se recombinant aux surfaces quand elles se quittent rapidement. Si l'on ne fait que presser les lames l'une sur l'autre, si même on les frappe fortement sans glissement, l'aiguille aimantée ne bouge pas, quoiqu'il doive se produire de l'électricité. Le côté vers lequel est repoussé le pôle nord de l'aiguille aimantée fait connaître, comme nous le verrons, par quelle extrémité du fil arrive le fluide positif. Dans la liste qui suit, chaque substance prend le fluide négatif avec celles qui la suivent, et le fluide positif, avec celles qui la précèdent :

Bismuth, palladium, platine; plomb, étain; nickel, cobalt; cuivre, or; argent, iridium, zinc, fer, cadmium, arsenic, antimoine, anthracite, peroxyde de manganèse.

M. Becquerel a remarqué que, dans cette liste, les métaux qui ont des propriétés physiques et chimiques analogues, ou qui se trouvent associés dans la nature, sont, en général, placés les uns à côté des autres; par exemple, le palladium et le platine, le plomb et l'étain, le nickel et le cobalt, le cuivre et l'argent, le zinc, le fer et le cadmium. Les divers métaux s'échauffent inégalement quand on les frotte les uns sur les autres (II, 1034) et c'est celui qui s'échauffe le plus qui prend l'électricité négative. Nous verrons plus tard que la chaleur est une source d'électricité; mais ici elle n'est pas la cause du dégagement, elle n'est qu'un effet concomitant et indépendant; car les résultats restent les mêmes quand les surfaces métalliques sont polies ou dépolies; et si, au lieu de plaques, on emploie des cylindres de cuivre et de fer, et qu'on fasse glisser un point de l'un d'eux sur une arête de l'autre, les résultats restent encore les mêmes, quel que soit le cylindre en repos.

On obtient encore de l'électricité en frottant deux masses d'un même métal l'une sur l'autre; mais il faut que l'une d'elles glisse sur la surface de l'autre, en la pressant toujours par les mêmes points; ce que l'on obtient en remplaçant l'une des lames par un bouton. Avec le *bismuth*, l'*antimoine*, le *fer*, le

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XLXVI, p. 133.

platine, le bouton prend l'électricité positive, quoiqu'il s'échauffe plus que la lame; il prend le fluide négatif avec le *cuivre*.

1415. Electricité produite par les métaux en limailles. — Singer avait reconnu que les limailles métalliques que l'on fait tomber à travers une capsule de cuivre criblée de petits trous, sur un plateau fixé à un électromètre à feuilles d'or, chargeaient ce dernier d'électricité positive. M. Becquerel a fait des expériences sur le même sujet [1]. La limaille est projetée sur une lame métallique tenue à la main (*fig.* 1037), et tombe ensuite sur le plateau d'un électromètre très sensible, que nous décrirons plus tard, et dans lequel une feuille d'or se trouve entre deux colonnes verticales électrisées au même degré, et d'une manière contraire. La limaille s'électrise en glissant sur la lame, qui n'est pas isolée, et apporte au plateau de l'électroscope l'électricité qu'elle a reçue.



Fig. 1037.

M. Becquerel a encore opéré au moyen d'un disque horizontal tournant rapidement sur lui-même, sous l'influence d'un système d'horlogerie placé sur le plateau de l'électromètre. La limaille tombait au centre du disque et était projetée en tous sens par la force centrifuge, après avoir glissé sur la surface de ce disque, en l'électrisant.

Par ces deux méthodes, M. Becquerel a trouvé les résultats suivants : la limaille projetée sur une lame de même métal prend l'électricité *négative;* l'effet est d'autant plus marqué qu'elle est plus fine et qu'elle tombe de plus haut. On peut dire, en général, que les limailles se comportent comme des corps dépolis en présence de corps polis. Les résultats sont plus prononcés avec les métaux oxydables qu'avec l'or, le platine, l'argent.

Quand la lame et la limaille sont formées de métaux différents, la tendance de la limaille à prendre le fluide négatif se manifeste encore, mais pas assez pour l'empêcher de s'électriser positivement quand le métal qui la forme prend le fluide positif lorsqu'il est en masse. Ainsi, la limaille des métaux oxydables s'électrise positivement en tombant sur les métaux les moins oxydables. Par exemple, la limaille de zinc prend le fluide *positif* en glissant sur des lames d'or, de platine, d'argent, de plombagine, de persulfure de fer, de cuivre et d'étain ; et le fluide *négatif*, sur le bismuth, l'antimoine et le fer; elle ne donne aucun signe d'électricité sur une plaque de peroxyde de manganèse. Les oxydes et les sulfures métalliques en limaille s'électrisent négativement en tombant sur des lames faites avec le métal qu'ils contiennent.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXVIII, p. 113.

Si l'on échauffe la limaille de zinc jusqu'à 60°, elle prend le fluide *négatif*, avec les métaux sur lesquels elle s'électrisait positivement à la température ordinaire. Quand la lame et la limaille sont portées en même temps à 60°, le résultat est encore plus marqué. L'effet est simplement exalté par la chaleur, avec les lames sur lesquelles le zinc prend le fluide négatif à la température ordinaire.

1116. Influence des circonstances qui accompagnent le frottement. — Peclet a fait des recherches importantes sur ce sujet au moyen d'une machine électrique et d'un électromètre particuliers [1]. La machine élec-

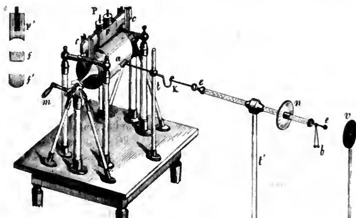


Fig. 1038.

trique (*fig.* 1038) consiste en un cylindre en verre, travaillé sur le tour, et recouvert d'une couche épaisse de gomme laque à ses extrémités. Ce cylindre peut tourner sur lui-même autour d'une barre de fer soutenue par des colonnes isolantes. Un frottoir F, placé à la partie supérieure du cylindre, est maintenu par des oreilles qui glissent dans les coulisses *c*, *c*, et chargé par des poids P. Le frottoir, en bois, présente en dessous la courbure du cylindre; il est garni de quelques peaux minces et flexibles sur lesquelles on applique successivement des feuilles de papier nu, cuivré, doré ou argenté; des feuilles d'étain ; des étoffes de laine, de soie, de coton; du taffetas gommé, de la peluche, etc..... Un conducteur isolé, *ak*, muni de pointes *a*, s'électrise par l'influence du cylindre tournant, proportionnellement à la charge électrique de ce dernier. L'électricité repoussée passe, par un fil métallique recouvert de soie *ke*, sur la tige en cuivre *ee* logée dans un tube de verre, supporté lui-même par la colonne isolante *t'*. *be* est un électromètre à pendules *b*, formés chacun d'un brin de paille terminé par une balle en moelle de sureau. L'un des pendules est

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LVII, p. 337.

fixe, et l'autre mobile autour d'une tige d'acier horizontale. Un cadran *n*, divisé en 400 parties, sert à mesurer l'écart des pendules, qui se projettent sur lui pour l'observateur qui regarde par un petit trou pratiqué au centre du disque *v*, fixé à plusieurs mètres des pendules. L'état hygrométrique de l'air ayant de l'influence sur les résultats, on ne compare que ceux qui sont observés dans les mêmes circonstances atmosphériques. Pour obtenir une vitesse uniforme, Peclet faisait faire un tour au cylindre pendant un même nombre de battements d'une montre. Voici les principaux résultats obtenus.

Influence du temps et de la vitesse. — Quand on emploie des substances frottantes qui ne s'altérent pas, on trouve que, pour une même vitesse, la tension augmente pendant quelques minutes, et reste ensuite constante. L'augmentation qui a lieu d'abord, paraît due aux déplacements, au premier moment, des molécules de la surface frottante, et aussi, peut-être, à l'élévation de température qui accompagne le frottement.

Des expériences faites avec des vitesses correspondantes à un tour pendant 8, 4, 2, 1 battement d'une montre, et avec des cylindres de verre, de résine et de taffetas ciré, ont donné des tensions indépendantes de la vitesse, pour les grandes comme pour les petites pressions. Cependant les substances garnies de longs filaments, comme la peluche de soie, le molleton, donnent des tensions qui augmentent avec la vitesse. Cela tient à ce que les filaments neutralisent au-delà du contact, une partie d'autant plus grande de l'électricité qu'emporte le cylindre, que ce dernier tourne plus lentement. On voit, en effet, ces filaments s'agiter sous l'influence de l'électricité, et devenir étincelants dans l'obscurité. On peut du reste, dans certains cas, faire disparaître ces anomalies, en rendant lisse la partie qui dépasse le contact.

Si l'on décharge le cylindre au moyen de franges ou de pointes non isolées, la tension diminue avec la vitesse, et d'autant plus que le frottoir est plus mauvais conducteur; c'est que l'électricité du cylindre doit, dans ce cas, se renouveler à chaque instant, et qu'elle le fait d'autant plus facilement que le fluide reçu par le frottoir s'écoule plus librement dans le sol. Si ce dernier ne se décharge pas, la quantité d'électricité conservée diminue, et on l'augmente, ainsi que la tension, en renouvelant plus souvent les frictions, c'est-à-dire en augmentant la vitesse. Quand l'air est humide, il décharge en partie le cylindre, et la tension diminue aussi avec la vitesse, mais très faiblement. Comme l'air enlève toujours un peu d'électricité au cylindre, on remarque que, pour les très petites vitesses, la tension diminue légérement.

La quantité absolue d'électricité produite, est aussi indépendante de la vitesse, c'est-à-dire qu'elle reste la même pour chaque tour, quelle que soit sa durée. Peclet a reconnu ce fait au moyen de l'électromètre de Lane, ou de la bouteille électrométrique (1320). Le nombre des décharges était toujours le même pour un même nombre de tours, quelle que fût la rapidité du mouvement; cependant, ce nombre augmentait avec la vitesse, quand le frottoir était mauvais conducteur.

Influence de la pression. — Des expériences faites avec différents frottoirs, sur des cylindres de verre et de résine, nus ou recouverts de taffetas ciré ou de satin, déchargés ou non par une frange, ont prouvé que pour les mêmes substances en présence, la pression n'a pas d'influence sur la tension électrique, la pression a varié de 1k,2 à 10k,2. Cependant, pour certaines substances, la tension augmentait jusqu'à 2 à 4k de pression ; ce qui tient probablement à ce que la surface du corps frottant touchait le cylindre par un plus grand nombre de points, quand la pression était plus forte ; c'est surtout pour la peluche et les substances d'une contexture analogue, que ce résultat était sensible. Il se présente aussi, parfois, des anomalies, que Peclet attribue à la chaleur que dégage le frottement. Cette chaleur, sensible surtout avec les frottoirs mauvais conducteurs, qui la conservent à leur surface, leur donne une tendance négative qui modifie les résultats.

Influence de l'étendue et de la forme de la surface frottante. — L'étendue de la surface frottante n'a pas d'influence sur la tension. Pour constater ce résultat, Peclet laissait dépasser la lame mince frottante, de manière à l'appliquer sur le cylindre dans une étendue plus ou moins grande au-delà du frottoir, et il relevait l'extrémité de cette lame sur ce dernier ; cette partie frottante, pressée seulement par son élasticité, produisait le même effet que la partie rigide du frottoir chargée de 10kil. Il résulte de là, que l'électricité recueillie est produite par le bord de la surface frottante. Quand la feuille n'est pas relevée, et que son bord libre est appuyé sur le cylindre, la déviation diminue avec la surface en contact ; ce qui tient à ce que le contact n'existe réellement qu'en quelques points, à cause du faible poids de la lame, et à ce qu'il se fait des recompositions au bord de la lame. Dans ces expériences et dans celles qui suivent, les pointes *a* (*fig.* 1038) étaient placées au-dessous du cylindre tournant.

La courbure du frottoir, *quand il est bon conducteur*, change aussi les résultats. Pour le constater, on tend plus ou moins la lame, dans les expériences qui précèdent, de manière à en changer la courbure au point où elle quitte le cylindre tournant. Des frottoirs, terminés par des surfaces planes ou convexes, comme *f* et *f'* (*fig.* 1038), et une autre plus convexe encore, ont donné des déviations de 58°, 57° et 55°. L'effet de la courbure paraît dû à la décomposition par influence du fluide neutre de la partie courbe, qui, électrisée d'une manière contraire au cylindre, augmente la destruction d'une partie de l'électricité qui se porte sur ce dernier. Le cuir, quand sa surface a l'aspect de la peluche, produit un effet inverse ; c'est que les filaments dont il est recouvert neutralisent d'autant plus d'électricité du cylindre, que le frottoir est moins convexe.

Enfin, l'épaisseur du corps frottant n'a pas d'influence sur la tension, quand on ne décharge pas le cylindre ; mais, dans le cas contraire, et quand le corps frottant est mauvais conducteur, la déviation diminue quand son épaisseur augmente, le fluide qu'il reçoit ne pouvant s'écouler dans le sol.

Nature du frottement. — Il y a deux espèces de frottement, l'un dit de *première espèce* ou de *glissement*, l'autre de *seconde espèce* ou de *roulement*. Peclet, ayant remplacé le frottoir de son appareil par un cylindre creux en cuivre garni de plusieurs couches de cuir, et muni de deux tourillons qui s'engageaient dans les coulisses *c*, *c* (*fig.* 1038), reconnut que les variations de vitesse et de pression suivent les mêmes lois que dans le frottement par glissement. Les métaux en feuilles, le papier, les peaux lisses, le satin du côté non satiné, produisent aussi les mêmes quantités d'électricité dans les deux espèces de frottement. Le satin du côté satiné en donne davantage par roulement que par glissement, ce que Peclet attribue à la faible conductibilité de la face satinée : dans le roulement, la surface de contact changeant continuellement, l'électricité qui se porte sur le rouleau est plus facilement enlevée que dans le glissement. Le molleton produit aussi une plus grande tension en roulant qu'en glissant ; c'est que les filaments qui déchargent le cylindre au-delà du contact s'en éloignent rapidement quand il y a roulement. Le taffetas ciré très sec donne les mêmes résultats avec les deux frottements ; mais quand il est glutineux et adhère au verre du cylindre, l'électricité change de nature avec l'espèce de frottement ; c'est que, dans le roulement, l'électricité est produite par la séparation mécanique de deux surfaces qui adhèrent, séparation qui est aussi une source d'électricité, comme nous allons le voir. Quand le cylindre est en verre dépoli ou en résine, il y a seulement diminution de tension.

On peut donc dire, en général, que les deux espèces de frottement donnent les mêmes résultats quand il n'y a pas de cause accidentelle d'anomalies. Il résulte de là que l'électricité dégagée par le frottement peut être attribuée à l'effet de la séparation des deux surfaces pressées l'une contre l'autre, ou à l'ébranlement moléculaire qui résulte de cette séparation.

1117. Production de l'électricité par un jet de vapeur. — Cette manière de produire de l'électricité se rattache au frottement. Elle a été trouvée par le hasard, en 1840, à la houillère de Séghill, près de Newcastle. Le mécanicien Patterson ayant saisi d'une main le levier de la soupape d'une chaudière à vapeur, pendant que l'autre main était plongée dans un jet de vapeur, sentit des picottements particuliers, et reconnut que le levier donnait des étincelles électriques. Plusieurs physiciens s'occupèrent de ce phénomène. M. Armstrong en fit une étude attentive[1], sur un grand nombre de chaudières, et notamment sur une locomotive, qu'il isola en appuyant les roues sur des socles formés de trois morceaux enduits de poix et séparés par des couches de poix et de papier. En montant sur un tabouret isolant et plongeant dans le jet de vapeur une tige de fer qu'il tenait à la main, il tirait des étincelles, avec l'autre main, des corps voisins non isolés. La tige de fer était électrisée positivement, et la locomotive, négativement.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. VII, p. 401.

Le même physicien fit ensuite des expériences au moyen d'un petit générateur en bronze construit exprès, et il constata que l'électricité prenait naissance dans la partie de l'ajutage occupée par le robinet, c'est-à-dire à l'endroit où le passage offert à la vapeur était rétréci. On avait admis d'abord que l'électricité était produite par l'expansion de la vapeur à sa sortie. M. Peltier l'attribuait au fait de la séparation de l'eau en vapeur, des matières qui se déposent en incrustations dans les chaudières. M. Gh. Schafhæult reconnut, à la suite de recherches étendues, que la vapeur doit être *mouillée* pour donner de l'électricité, et il pensait que ce fluide était produit dans le conflit entre la vapeur et les gouttelettes d'eau qui s'y trouvent mêlées. Enfin, M. Faraday prouva que l'électricité se dégage dans le frottement contre les parois de l'ajutage de sortie, des gouttelettes emportées par la vapeur [1].

Dans l'appareil de M. Faraday, la vapeur traversait horizontalement un ballon métallique *o* (*fig.* 1039), portant l'ajutage, et précédé d'un tube à robinet destiné à recevoir l'eau condensée dans le conduit. Quand il y avait de l'eau dans le ballon, il se produisait beaucoup d'électricité ; mais quand le

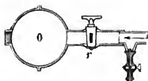


Fig. 1039.


Fig. 1040.



Fig. 1041.

ballon était vide, et la vapeur bien sèche, il ne s'en produisait plus. La substance et la forme de l'ajutage avaient une grande influence. M. Faraday a souvent employé un ajutage évasé (*fig.* 1040), auquel il présentait le sommet d'un cône fait successivement avec diverses substances. Un petit tube vertical à robinet (*fig.* 1041), disposé près de l'orifice de certains ajutages, servait à introduire différents liquides dans le jet de vapeur. Quand on introduisait de l'eau commune ou mêlée de quelque substance saline, alcaline ou acide, il ne se dégageait pas d'électricité ; tandis qu'avec l'eau distillée, il s'en dégageait beaucoup. Il en était de même quand le liquide était mis d'avance dans le ballon. Ce résultat s'explique par l'augmentation de conductibilité que les substances dissoutes communiquent à l'eau ; alors les électricités séparées par le frottement, se recombinent aussitôt. L'ammoniaque, qui n'augmente pas sensiblement la conductibilité de l'eau quand elle y est mêlée en petite quantité, n'empêche pas le dégagement de l'électricité.

L'électricité dégagée est généralement positive dans le jet de vapeur, et négative sur le corps solide qu'il rencontre, quel qu'il soit. M. Faraday a opéré

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. II, p. 37 et X, p. 88.

sur plus de 30 substances différentes : des métaux, des poils, différentes substances textiles, des corps isolants, divers minéraux. Ces substances, soutenues dans le jet de vapeur par un support isolant, étaient mises en communication avec un électromètre à feuilles d'or. Les fils étaient tendus sur une fourchette en métal.

Quand, au lieu d'eau, on introduit dans le jet, de l'essence de térébenthine, de l'huile, des dissolutions de résines, le jet emporte le fluide négatif, et le corps frotté prend le fluide positif. Certaines substances ont donné des résultats douteux ; ce sont celles qui, en adhérant au corps choqué par la vapeur, deviennent corps frotté au lieu de corps frottant.

La quantité d'électricité produite dans un jet de vapeur mêlé de gouttelettes, est d'autant plus grande que la force élastique est plus considérable, et le choc plus intense. Les *machines hydro-électriques* nous offrent une application heureuse de ces phénomènes (1279).

1418. Electricité dégagée par le frottement des gaz. — Divers physiciens, Wilson, Henley, Volta, Marx..., sont parvenus à électriser différents corps par le choc d'un courant d'air ; mais les résultats étaient inconstants et souvent contradictoires, lorsque M. Faraday reconnut qu'ils dépendent de l'état de l'air : quand il est sec, il ne se produit pas d'électricité ; mais quand il est humide, ou mêlé de poussières diverses, il s'en dégage plus ou moins, dont la nature dépend de la substance des poudres. Quand l'air entraîne avec lui des gouttelettes d'eau, l'espèce d'électricité dépend de la substance du tube par lequel sort le jet d'air comprimé. M. Armstrong, en laissant sortir par un tube de verre, de l'air comprimé à 8 atmosphères dans un récipient isolé, vit ce dernier se charger tantôt de fluide positif, tantôt de fluide négatif, tantôt enfin rester à l'état neutre. C'est surtout quand l'intérieur du récipient est humide, que l'électricité se dégage abondamment ; si on l'échauffe de manière à en dessécher l'air, on n'en obtient plus. On doit conclure de là que le frottement des particules d'eau se condensant dans le jet, ou des poussières mélangées, est nécessaire au développement de l'électricité par le frottement des gaz contre les corps solides.

1419. — De quelques objections à l'opinion que le frottement est une source d'électricité. — Comme le frottement est accompagné d'un dégagement de chaleur, et que la chaleur est une source d'électricité, quelques physiciens ont admis que l'électricité dégagée pendant le frottement était due à la chaleur qu'il produit. Remarquons d'abord que le frottement de roulement dégage beaucoup moins de chaleur que l'autre, et que cependant il produit autant d'électricité. M. Gaugain [1] a bien, il est vrai, trouvé qu'en échauffant directement un disque métallique posé sur un second disque, autant qu'il l'était par le frottement, on obtenait sensiblement la même quantité d'électricité, ou la même déviation de l'aiguille d'un réomètre. Mais nous verrons que le déga-

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XXXVI, p. 144.

gement de l'électricité par la chaleur est dû aux déplacements moléculaires qu'elle produit; alors, comme l'a fait remarquer M. de La Rive, il n'est pas étonnant de voir le dérangement moléculaire produit par le frottement des deux lames, donner autant d'électricité que ce même dérangement occasionné par l'échauffement direct de l'une d'elles.

Wollaston, frappé de la grande quantité d'électricité qui se dégage dans les actions chimiques, a voulu attribuer à une action de ce genre celle qui prend naissance dans le frottement [1]. Il expliquait par là l'efficacité des amalgames et des autres substances très oxydables dont on recouvre les coussins des machines électriques. Ayant renfermé une petite machine électrique sous un récipient rempli d'acide carbonique, il n'obtint plus d'électricité. Il annonça aussi que des coussins garnis d'amalgame d'argent, ou d'un métal non oxydable, ne lui avaient donné aucune trace d'électricité ; d'où il conclut que l'électricité des machines était due à une oxydation. Mais on peut répondre à ces expériences, par des faits très concluants : d'abord, nous avons vu que l'on peut produire de l'électricité par le frottement *dans le vide* (1299). Gay-Lussac a obtenu de l'électricité dans l'acide carbonique, en ayant soin de bien dessécher ce gaz ; ce qui présente quelque difficulté, à cause de la force avec laquelle il retient l'humidité. Plus tard, Peclet a repris cette question. Il commença par constater que la déperdition de l'électricité est la même dans l'air et dans l'acide carbonique secs. Il employa, pour cela, deux balances de torsion identiques en tout : il s'assura de cette identité, en observant la déperdition de l'aiguille mobile, électrisée au moyen de boules isolées également chargées. Ayant ensuite rempli l'une des balances, d'air, et l'autre d'acide carbonique bien desséchés, il constata, ce que M. Matteucci a aussi trouvé depuis (1344), que la déperdition est la même dans les deux gaz. Cela fait, Peclet a disposé un appareil (*fig.* 1042) dans lequel un cylindre *c*, pressé par un coussin, peut être mis en mouvement au moyen d'une manivelle *m*. Ce cylindre est renfermé dans un vase en verre, dans lequel on peut faire le vide, et introduire différents gaz par le robinet *r*. Les quantités d'électricité recueillies au moyen des pointes et du conducteur *e*, ont été les mêmes quand le vase était rempli d'air, d'hydrogène ou d'acide carbonique bien desséchés. D'où l'on peut conclure que l'électricité développée n'était pas due à une oxydation.

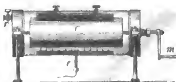


Fig. 1042.

Les expériences de M. E. Becquerel, citées plus haut (1412), conduisent à la même conclusion ; car, si les substances les plus oxydables donnent la plus grande tension, des substances très différentes, comme le talc, la farine,

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XVI, p. 52.

la plombagine, en donnent aussi une très grande, quoiqu'elles ne produisent pas d'actions chimiques pendant le frottement, et qu'elles soient très douces au toucher.

II. Electricité produite par pression, clivage, ébranlements moléculaires.

1420. PRESSION. — Il suffit de presser deux corps l'un contre l'autre pour que, en les séparant, on les trouve chargés d'électricités contraires. Ce fait a été découvert par Æpinus, au moyen de deux plaques de verre. Plus tard, Libes ayant légérement pressé un disque de laiton isolé, contre une feuille de taffetas gommée appliquée sur du bois, trouva, après la séparation, le métal électrisé *négativement*, et le taffetas *positivement*. Ce résultat ne peut être attribué à un frottement involontaire; car, si l'on frotte les deux surfaces, le métal prend le fluide positif. Des disques d'argent, de cuivre, de zinc, etc., donnent les mêmes résultats que le laiton.

M. Becquerel a reconnu qu'il se produit de l'électricité toutes les fois qu'un corps flexible est pressé contre un autre corps, et qu'on les sépare au moyen de manches isolants, pourvu que l'un au moins de ces corps soit mauvais conducteur. Il est probable que dans le cas où ils sont tous deux bons conducteurs, les électricités se séparent encore, mais qu'elles se recombinent aussitôt; on remarque, en effet, que les charges sont d'autant plus fortes, avec les corps un peu conducteurs, que la séparation est faite plus vivement. La nature de l'électricité reçue par chaque corps dépend de sa nature et de celle de l'autre corps. Par exemple, le liége prend le fluide négatif avec les minéraux à surface vitreuse, et le fluide positif, quand on le presse sur des disques de houille, succin, cuivre, zinc, argent, écorce d'orange, caoutchouc, poils d'animaux. La chaleur manifeste encore ici son influence ordinaire : le spath d'Islande chaud prend l'électricité négative avec le liége; un disque de liége chaud s'électrise négativement quand on le presse sur un autre disque de liége froid. L'humidité des surfaces est un obstacle au dégagement de l'électricité par pression; il faut donc dessécher les corps avant l'expérience.

1421. Pression des cristaux. — Haüy a découvert un autre mode d'électrisation par la pression [1] : ayant pressé entre ses doigts, pendant un temps très court, une lame de spath d'Islande, il la trouva électrisée positivement. En la pressant entre deux morceaux d'étoffe ou de quelque autre matière flexible, il obtint le même résultat, mais moins prononcé. Les corps rigides, comme le bois, ne donnent aucun résultat; il faut que la substance puisse se mouler sur la surface du cristal en déplaçant les molécules, qui reviennent ensuite à leur première position par leur élasticité. Une foule de cristaux naturels s'élec-

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. V, p. 72.

trisent comme le spath d'Islande. Il faut que les faces soient brillantes et polies comme celles que l'on obtient par le clivage. L'espèce d'électricité dépend à la fois de la nature du cristal et de la substance qui le presse.

Un fait remarquable, c'est que les cristaux qui s'électrisent par pression conservent leur électricité pendant très longtemps. Le spath d'Islande, sur lequel Haüy, par un hasard heureux, a fait ses premiers essais, est le corps qui présente cette propriété au plus haut degré; on l'a vu rester électrisé pendant 11 jours. La topaze du Brésil, la chaux fluatée, conservent leur électricité pendant quelques heures seulement; le corindon, l'émeraude, le spinelle, pendant 5 ou 6 heures; l'aragonite, qui a la même composition que le spath d'Islande, pendant 1 heure; le cristal de roche, le diamant, pendant 15 ou 20 minutes. Ces nombres ne sont qu'approximatifs, les résultats dépendant de la charge électrique. La *faculté conservatrice* de certains cristaux se manifeste encore quand l'électricité est produite par le frottement. Elle paraît due à la pénétration de l'électricité à une certaine profondeur au-dessous de la surface; car, si l'on applique ces cristaux électrisés, sur des corps bons conducteurs, si même on les plonge dans l'eau, ils restent encore électrisés.



Fig. 1043.

Aiguille électrique. — Haüy a appliqué la faculté conservatrice du spath d'Islande à la construction d'un électroscope qui fait connaître immédiatement la nature de l'électricité. Cet instrument (*fig.* 1043) est une aiguille électrique (1259) dont un des boutons est remplacé par une lame de spath d'Islande *a*, que l'on électrise positivement par la pression des doigts. On peut ensuite reconnaître facilement la nature de l'électricité des corps qu'on en approche.

1422. Lois du dégagement de l'électricité par la pression. — Ces lois ont été trouvées par M. Becquerel [1]. Il a reconnu que les tensions électriques de deux surfaces polies sont proportionnelles aux pressions qui les retiennent l'une contre l'autre, quand on les sépare assez vivement pour obtenir le maximum d'intensité électrique. Les charges étaient mesurées au moyen d'une balance de torsion particulière; les pressions variaient depuis 1 jusqu'à 10^{kil}. Le spath d'Islande, le sulfate de baryte, le quartz hyalin, et le sulfate de chaux, pressés avec du liége, ont pris des charges différentes entre elles, comme les nombres 6; 4,2; 3,9; 1,9. L'état de la surface a parfois une grande influence; c'est ainsi que le spath d'Islande dont les faces sont obtenues par clivage, s'électrise 3 fois plus que celui dont les faces ont été polies artificiellement.

Remarquons que l'électricité de pression ne s'observe qu'après la séparation des surfaces en contact. M. Becquerel pense que, au moment de la compression, les deux surfaces prennent les fluides contraires, qui ne peuvent franchir

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXI, p. 5.

la surface de séparation tant que dure la pression. Dès qu'on la diminue pour éloigner les deux corps, une portion seulement des fluides se recombine, et l'on en conserve une quantité d'autant plus grande que la séparation est plus rapide. Ne pourrait-on pas supposer, au contraire, que, pendant la compression, il n'y a pas d'électricité libre, mais que c'est au moment de la séparation des surfaces, que l'ébranlement moléculaire, produit par l'élasticité, décompose le fluide neutre? Les expériences qui suivent semblent conduire à cette dernière explication.

1123. — ELECTRICITÉ PRODUITE PAR LE CLIVAGE, etc. — On sait depuis longtemps que lorsqu'on sépare par clivage, des lames de mica, elles répandent de la lumière visible dans l'obscurité. Quand on tient les lames que l'on veut séparer, par des tiges isolantes fixées avec de la cire, on les trouve électrisées d'une manière opposée, et d'autant plus, que la séparation est faite plus vivement. M. Becquerel[1] a vérifié cette propriété sur divers minéraux cristallisés bien desséchés : les sulfates de chaux et de baryte, le talc, des topazes... La galène, les pyrites, qui conduisent bien l'électricité, ne donnent aucun résultat. Quelque minces que soient les feuilles de mica enlevées, le phénomène se produit de la même manière; d'où M. Becquerel conclut qu'il aurait encore lieu dans la séparation de deux molécules. On voit que, les faces qui se séparent emportant des électricités opposées, les molécules doivent y être arrangées en couches, de manière à présenter d'un même côté des points jouissant tous des mêmes propriétés, et du côté opposé, des points jouissant de propriétés aussi égales entre elles, mais différentes de celles de la face opposée de la couche. Quand on presse l'une sur l'autre les deux faces que l'on vient de cliver, pour les séparer ensuite, elles reprennent l'électricité qu'elles avaient reçue par le clivage. Si l'on chauffe un peu la lame qui prend le fluide négatif, le résultat est plus prononcé.

Séparation des corps adhérents. — Ce n'est pas seulement en détruisant l'adhérence entre les lamelles des cristaux que l'on produit de l'électricité : si l'on dédouble une carte à jouer, on trouve les deux moitiés électrisées d'une manière contraire. Si l'on coule du soufre, de la résine, de la gomme laque dans des vases coniques en verre, en bois, etc., et que l'on vienne à séparer la matière, solidifiée, des parois du vase, ce dernier est électrisé positivement, et la résine, négativement. Le chocolat, l'acide phosphorique donnent des résultats analogues. Ce phénomène, découvert par Wilke, avait fait croire d'abord qu'il y avait de l'électricité produite pendant la solidification des liquides. Mais Gay-Lussac a reconnu que la séparation de la substance solidifiée, soit par le retrait qu'elle éprouve, soit par toute autre cause, précède toujours l'apparition de l'électricité. Van-Marum procédait en versant de la résine fondue, sur le mercure, et l'en séparant ensuite. Le protochlorure de mercure sublimé et condensé dans le col d'un matras en verre, se trouve aussi électrisé quand on l'en sépare mécaniquement.

[1] *Annales de chimie et de phhsique*, 2e série, t. II, p. 16, et t. XXXVI, p. 265

1124. ÉLECTRICITÉ PRODUITE PAR L'ÉBRANLEMENT DIRECT DES MOLÉCULES. — Quand on écrase un corps, il produit souvent une lueur électrique visible dans l'obscurité. La craie produit cet effet, quand on l'écrase sous le marteau; le sucre, quand on l'écrase entre les doigts, même sous l'eau. Le choc des silex produit aussi une lueur attribuée à la même cause. Pendant qu'un fil passe à la filière, il y a déviation dans l'aiguille d'un réomètre mis en communication avec ses extrémités; ici il y a à la fois compression, frottement et déplacement permanent des molécules. M. Becquerel explique, par l'électricité dégagée par la compression, la lumière assez vive que répandent subitement les blocs de glace des mers polaires, quand ils se heurtent avec l'énorme puissance que comporte leur masse.

Division, mécanique. — Quand on lime, ou qu'on racle certaines substances peu conductrices, comme le soufre, les résines, la cire, le suif, le chocolat, les parcelles détachées, reçues sur le plateau d'un électroscope, sont électrisées, et d'ordinaire positivement. Les résultats varient, suivant que l'on racle avec une lame tranchante ou émoussée : dans le premier cas, les parcelles de gomme laque sont électrisées négativement, et positivement quand le tranchant est émoussé. Le bois de hêtre chaud donne des parcelles positives quand on le racle avec une lame émoussée, et négatives, avec une lame tranchante. Quand le bois est froid, les copeaux sont toujours négatifs.

Flexions. — Peltier est parvenu à obtenir de l'électricité par de simples flexions produites dans un fil de cuivre. Ce fil, non recuit, était courbé en cercle, et ses extrémités mises en communication avec un réomètre; il était soutenu de distance en distance par des supports. Si l'on venait à infléchir successivement dans deux sens opposés, une des parties libres de ce cercle, on observait une déviation de l'aiguille du réomètre, annonçant une production d'électricité. Il arrive assez souvent qu'on n'obtient pas de résultat, ce qui a lieu probablement quand la flexion est symétrique de part et d'autre du point attaqué. Si, dans ce cas, on change la structure du fil près d'un des appuis, soit en l'écrouissant, soit en le recuisant, l'électricité se manifeste beaucoup plus facilement[1]. On peut aussi lui donner naissance en frottant le fil, comme pour le faire vibrer longitudinalement.

1125. Vibrations. — Il y a encore dégagement d'électricité dans les vibrations. M. Sullivan[2], ayant fait vibrer un fil tendu, dont une moitié était en laiton et l'autre moitié en fer, soudées bout à bout, vit une légère déviation dans l'aiguille d'un réomètre dont le fil était joint par ses extrémités à celles du fil en vibration. La déviation cessait en même temps que la vibration. L'effet

[1] Ces expériences pourraient laisser des doutes, à cause de l'électricité d'induction qui peut naître dans le fil pendant qu'on le déplace, sous l'influence du magnétisme terrestre, comme nous le verrons plus tard. C'est pourquoi on opère en orientant le cercle dans différents azimuts par rapport au méridien magnétique.

[2] *Archives de l'électricité*, t. V, p. 480.

était plus marqué avec des barreaux de bismuth et d'antimoine, formant une longueur totale de 25 centimètres, et qu'on faisait vibrer par le choc d'une baguette de métal. Du fer à structure grenue, et du fer fibreux joints bont à bout, donnent des résultats semblables ; ce qui montre que l'effet dépend de la différence de structure des deux corps, et de la manière dont les vibrations s'y propagent.

Polarité électrostatique, par les vibrations. — M. Volpicelli a produit, au moyen des vibrations, de l'électricité polaire, dans des conditions très remarquables[1]. Ayant fait glisser des bâtons de verre, gomme laque, soufre dans un ou plusieurs anneaux métalliques isolés ou non, il trouva que ces bâtons présentaient à leurs extrémités des électricités contraires, séparées par une ligne neutre. L'extrémité qui marchait en avant pendant le glissement, était électrisée positivement quand il opérait avec le verre, et négativement avec les résines ou le soufre. Pour trouver la cause de ce phénomène, M. Volpicelli recouvrit d'une couche de résine ou de soufre, sur une longueur de 30 centimètres, l'extrémité d'un barreau en laiton de 1^m,5 de longueur; la couche isolante avait $\frac{1}{4}$ centimètre d'épaisseur, et était munie d'une petite virole métallique. Quand le barreau, tenu par sa partie non recouverte, glissait dans un anneau, la virole, qui communiquait par un fil métallique avec un électromètre à condensateur, ou l'électroscope de la *fig.* 1037, était électrisée négativement quand elle se trouvait en avant du mouvement, et positivement quand elle reculait. Quand le barreau glissait dans l'anneau isolé, pendant qu'on la tenait par la virole, il prenait l'électricité contraire à celle qu'eût prise la virole si elle eût été isolée. Les électricités recueillies dans les deux cas provenaient des fluides dégagés aux surfaces intérieure et extérieure de la couche résineuse par les vibrations qui accompagnaient les frictions, puisque ces frictions ne s'exerçaient que sur la partie nue de la barre. Quand les deux extrémités étaient recouvertes en même temps d'une couche isolante, chacune d'elles éprouvait les mêmes effets que si elle eût été seule. M. Volpicelli ayant remplacé la résine et le soufre par une enveloppe de verre, trouva les mêmes résultats, seulement les électricités étaient distribuées en sens inverse de ce qui a lieu pour la résine. Les résultats sont encore plus marqués quand l'anneau est de même substance que la barre, l'ébranlement étant alors plus prononcé, ce qui montre que l'électricité n'est pas due au frottement. Ils se reproduisent, mais à des degrés différents, avec des barres d'argent, de fer ou d'acier; ils ne sont faciles à observer qu'autant que l'air est très sec.

[1] *Comptes-rendus de l'Acad. des sc.* de Paris, t. XXXVIII, p. 351 et 877, et *Bibl de Gen.* (Archives des sciences), t. XXX.

§ 2. — ÉLECTRICITÉ PRODUITE PAR LES ACTIONS CHIMIQUES. — PILES HYDRO-ÉLECTRIQUES.

1426. Quand les corps se combinent chimiquement ou qu'ils se décomposent, il y a production des deux électricités. Les fluides séparés tendent à se recombiner aussitôt; mais on peut, par divers moyens, les recueillir, au moins en partie, sur deux conducteurs différents. Parmi les phénomènes chimiques, il faut distinguer l'action de certains liquides sur les métaux. Cette action donne lieu à un grand dégagement d'électricité; mais on a méconnu pendant longtemps l'origine de cette électricité, qu'on a attribuée d'abord à une force mystérieuse que l'on supposait agir au contact des corps de nature différente. Volta a basé sur cette hypothèse toute une théorie ingénieuse, qui a pendant longtemps suffi à la science, et qui l'a conduit à imaginer l'instrument le plus merveilleux et le plus fécond en applications qu'il ait été donné aux physiciens d'utiliser, la *pile de Volta*. C'est à Galvani que l'on doit la découverte des premiers faits qui ont provoqué les recherches de Volta; c'est pourquoi les physiciens ont donné le nom de *galvanisme* à la branche d'électricité dont la création fut la conséquence de ces brillantes recherches. Nous allons d'abord faire connaître les faits découverts par Galvani et par Volta; nous montrerons ensuite comment ils s'expliquent par l'électricité qui se dégage dans les actions chimiques.

I. Galvanisme. — Pile de Volta.

1427. Expériences de Galvani. — En 1780, Galvani, professeur d'anatomie à Bologne, s'occupant d'études sur le fluide nerveux, et sur l'influence de l'électricité sur les nerfs, remarqua par hasard des convulsions dans les membres dépouillés d'une grenouille fraîchement tuée. Ces convulsions se manifestaient au moment où l'on déchargeait une machine électrique placée à une petite distance. Ce n'était là qu'un effet de *choc en retour*, bien connu alors des physiciens et de Galvani lui-même, quoiqu'on ait dit le contraire. Il se mit aussitôt à étudier les circonstances du phénomène, tant sur les animaux à sang froid que sur ceux à sang chaud, dans l'espérance de démontrer l'identité du fluide nerveux et de l'électricité. Il consacra 6 années à ce travail [1].

Dans le cours de ces recherches, il voulut voir si la décharge des nuages orageux produirait le même effet que celle d'une machine; et il trouva qu'il en

[1] *Sur les recherches de Galvani*, par M. Gavarret; *Ann. de ch. et de phys.*, 3[e] série, t. XXV, p. 58.

était ainsi. Un jour, en 1786, ayant suspendu à un balcon *en fer* de la terrasse du palais Zambeccari, les membres inférieurs d'une grenouille, au moyen d'un crochet *en cuivre* qui traversait la moelle épinière, il vit, avec une surprise bien légitime, ces membres s'agiter convulsivement en l'absence de tout orage, et il remarqua que cela avait lieu au moment où les membres venaient accidentellement toucher le fer du balcon. Il put dès lors répéter l'expérience aussi souvent qu'il voulut, et se trouva en possession d'un fait nouveau, inattendu, qui est devenu le point de départ d'une longue suite de brillantes découvertes, et l'origine d'une partie des plus étendues et des plus importantes de la physique[1].

L'expérience de Galvani fut bientôt connue du monde savant; elle excita un étonnement général, et chacun s'empressa de la répéter. Galvani avait remarqué que les contractions n'avaient lieu qu'au moment où un arc conducteur établissait une communication entre les muscles des jambes, et les nerfs lombaires de la grenouille. Il constata aussi que ces contractions étaient bien plus vives quand l'arc était formé de deux métaux différents placés l'un à la suite de l'autre. On reconnut aussi plus tard que la communication entre les deux métaux pouvait être établie par plusieurs personnes se donnant la main.

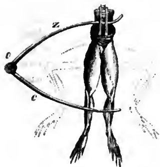


Fig. 1044.

Pour répéter l'expérience de Galvani, on coupe en deux, avec des ciseaux, une grenouille vivante, vers la région lombaire; on dépouille les membres inférieurs, et l'on met à découvert les deux faisceaux de nerfs qui se voient de chaque côté de la colonne vertébrale (*fig.* 1044). On engage sous ces faisceaux l'une des branches d'un arc articulé *zoc*, formé de deux métaux différents, par exemple de cuivre c, et de zinc z, et l'on appuie l'autre branche sur les jambes pendantes de l'animal; on les voit aussitôt s'agiter convulsivement. Au lieu de cet arc, on peut employer deux disques de métaux différents : on appuie le bord de l'un d'eux sur les muscles lombaires, le bord de l'autre sur les nerfs, puis on rabat l'un des disques sur l'autre de manière à le lui faire toucher; aussitôt les mouvements convulsifs se manifestent. Au bout de quelque temps, la raideur cadavérique empêche la reproduction du phénoméne. Les

[1] Pour répondre à ceux qui prétendent que le hasard seul est le promoteur des découvertes originales, nous dirons que déjà deux fois le hasard avait offert l'occasion de faire la découverte de Galvani : en 1767, Sulzer avait remarqué que deux disques métalliques différents étant appliqués l'un au-dessus de la langue, l'autre au-dessous, produisent une saveur acide ou amère, quand on les joint par leur bord extérieur. En 1786, un étudiant de Bologne éprouva une légère commotion à la main, en disséquant une souris.

animaux à sang froid conviennent mieux, pour ces sortes d'expériences, que les animaux à sang chaud, parce que leurs muscles sont plus excitables, et conservent plus longtemps leur irritabilité.

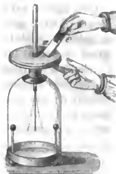
1428. — Théorie de Galvani. — Pour expliquer les contractions de la grenouille, Galvani supposa qu'il y avait dans les nerfs, une électricité propre au corps des animaux, et que ce *fluide vital*, comme il l'appelait, passant des nerfs dans les muscles par l'arc métallique, y produisait la contraction. Il assimilait ainsi le corps de la grenouille à une bouteille de Leyde, dont les muscles et les nerfs formeraient les armatures, et qui aurait été chargée d'un fluide analogue, mais non identique, à l'électricité, et qu'on a nommé depuis *fluide galvanique*.

Cette théorie eut d'abord un succès universel ; mais elle fut bientôt abandonnée. Volta, professeur à Pavie, répétait avec soin toutes les expériences de Galvani ; il fut frappé de la nécessité d'employer deux métaux différents quand on voulait produire des contractions prononcées. Il combattit alors l'explication de Galvani, qu'il avait d'abord adoptée, il soutint que le corps de la grenouille ne jouait dans le phénomène qu'un rôle purement passif, et que l'électricité dont on observait les effets, prenait naissance dans l'arc de communication. Il avança que le *contact* entre les molécules différentes des deux métaux qui composent cet arc, détruisait l'équilibre du fluide neutre, et déterminait sa décomposition : l'une des électricités était chassée sur l'un des métaux, et l'autre sur le métal juxtaposé. Ces deux fluides se combinant ensuite à travers les membres très excitables de la grenouille, y déterminaient des contractions.

Galvani et ses partisans se défendirent avec ardeur ; ils tentèrent de prouver qu'un seul métal suffisait pour produire des contractions, et ils en obtinrent en effet, mais elles étaient très faibles. Hallé et Wels firent observer alors que les métaux communs ne sont pas purs, et ils montrèrent que les contractions deviennent plus fortes, quand on a frotté une des extrémités de l'arc, avec un autre métal. Galvani montra alors que des membres de grenouille étendus sur le mercure, éprouvent de légères agitations au bout des doigts; on objecta que les couteaux avec lesquels on les avait dépecés avaient laissé quelques parcelles de métal sur les muscles en contact avec le mercure. Galvani se servit alors de couteaux en verre, et les résultats restèrent les mêmes. Mais on trouva dans l'humidité qui tachait le mercure aux points touchés par les membres frais, une cause suffisante pour expliquer les faibles mouvements observés. La discussion continuait ainsi avec des chances diverses; les expériences se multipliaient, on les variait de toutes les manières. Galvani expérimentant avec son neveu Aldini, reconnut qu'il suffisait de mettre en contact avec les nerfs lombaires, quelques parties des muscles, pour obtenir des contractions sensibles, et il crut bien, cette fois, avoir fermé la bouche à ses adversaires. Mais, tout au contraire, Volta trouva dans ce fait une généralisation de son principe : il n'y avait pas que les métaux en contact qui pouvaient développer de

l'électricité, toutes les substances conductrices étaient dans le même cas. La discussion durait ainsi depuis dix ans, quand Pfaff, professeur à Kiel, ou, suivant d'autres, Volta et Fowler, reconnurent que les convulsions se produisent aussi bien au moment où l'on supprime la communication, qu'au moment où on l'établit. Ce résultat, inexplicable dans la théorie de Galvani, la fit dès lors abandonner, et les idées de Volta furent généralement adoptées.

1429. Expériences de Volta. — Volta a fait un grand nombre d'expériences pour prouver directement qu'il se produit de l'électricité dans le contact des métaux. Il s'est servi pour cela principalement, de cuivre en contact avec du zinc ou de l'argent, ayant remarqué que ces métaux produisent de fortes contractions galvaniques. Il prit d'abord deux disques, l'un en zinc, l'autre en cuivre, isolés par des manches de verre, les appuya l'un sur l'autre, les sépara, et fit toucher le disque de cuivre au plateau collecteur de l'électromètre à condensateur (*fig.* 1045), dont l'autre plateau communiquait avec le sol. Ayant déchargé le disque de zinc, il répéta l'expérience une seconde fois, puis une troisième....., et il vit les feuilles d'or s'écarter, quand ensuite il enleva le plateau supérieur. Il reconnut ainsi que le disque de cuivre avait pris le fluide négatif, et le zinc, le fluide positif.


Fig. 1045.

Comme on pouvait objecter que l'électricité était produite par le frottement ou la pression des deux disques, Volta fit souder l'une au bout de l'autre une lame de zinc et une lame de cuivre, comme on le voit en *zc* (*fig.* 1045), prit la première entre ses doigts, et appuya l'autre sur le condensateur de l'électromètre. Au bout de quelque temps, il trouva les feuilles d'or chargées de fluide positif; d'où il conclut que le plateau collecteur avait reçu, du cuivre, du fluide négatif. Pour recueillir l'électricité positive qui se porte sur le zinc, on tient le cuivre avec la main, et l'on fait communiquer le zinc avec le plateau de l'électromètre; seulement, il faut que ce dernier soit en zinc, ou, s'il est en cuivre, qu'il soit séparé de la lame de zinc par du papier mouillé. Sans ces précautions, il y aurait deux points où du zinc serait en contact avec du cuivre, et les effets se contrarieraient.

Au lieu de tenir l'une des lames avec les doigts, pour la faire communiquer avec le sol, on peut se contenter de lui donner une très grande surface, sur laquelle le fluide se répand, ou la faire communiquer avec l'intérieur d'une bouteille de Leyde non isolée.

1430. Force électromotrice. — Volta crut pouvoir conclure de ces expériences, qu'il se développe de l'électricité au contact des corps conducteurs, qu'il nomme, à cause de cette propriété, *corps électromoteurs*. Les métaux sont les *électromoteurs* les plus parfaits. Les liquides en contact avec les métaux

ne sont pas électromoteurs, suivant Volta, ou du moins ne le sont que très peu. L'électricité attribuée au contact a été appelée *électricité voltaïque*. Volta a donné le nom de *force électromotrice* à la cause inconnue qui agit au contact pour décomposer le fluide neutre, et il s'est appliqué à déterminer les propriétés et la manière d'agir de cette force. On peut formuler de la manière suivante les résultats de ses recherches :

1° La force électromotrice décompose le fluide neutre qui existe à la surface de contact des deux métaux ; elle chasse sur l'un d'eux le fluide positif provenant de cette décomposition, et sur l'autre, le fluide négatif. 2° Cette force s'oppose à la recomposition des fluides à travers la surface de contact. 3° Elle est limitée et ne peut décomposer et maintenir décomposée qu'une quantité déterminée de fluide, présentant une tension maximum qui ne peut être dépassée, mais qui est toujours atteinte instantanément. 4° L'effet est indépendant du nombre des points de contact ; un seul point donne le même résultat qu'une large étendue de surface.

Cela posé, considérons deux corps de nature différente, de même surface S isolés et en contact ; par exemple, une lame de zinc et une lame de cuivre. Le zinc prendra une tension $+\frac{1}{2}a$ d'électricité positive, et le cuivre une tension $-\frac{1}{2}a$ de fluide négatif, de manière que la différence algébrique des tensions des deux lames sera égale à la quantité a, qui dépend de la nature des substances en contact. Si l'on fait communiquer le cuivre avec le sol, il perdra son électricité, la force électromotrice ne sera plus contrebalancée par l'attraction mutuelle des deux fluides, et de nouvelle électricité se produira instantanément et donnera au zinc la tension a, de manière que la différence de tension des deux lames soit toujours égale à a. Si ensuite, la communication du cuivre avec le sol étant supprimée, on vient à fournir de nouvelle électricité au zinc, celle-ci ne pourra être arrêtée par la force électromotrice, et se répandra également sur les deux lames, en y apportant une augmentation de tension b ; de manière que, la tension étant $a+b$ sur le zinc, et b sur le cuivre, la différence soit toujours égale à a.

Si les plaques isolées et en contact ont des surfaces inégales, S, S′, on calculera les tensions x, y sur ces lames, en remarquant que les quantités d'électricité doivent être égales sur les deux surfaces, et qu'elles sont proportionnelles, sur chaque surface, à son aire et à la tension. On aura donc $Sx = S'y$. De plus, la différence algébrique des tensions devant toujours être égale à a, on aura $x+y=a$; ces deux équations donneront les valeurs de x et de y. — C'est en partant des considérations qui précèdent que Volta a été conduit à la découverte de l'appareil admirable dont nous allons maintenant nous occuper.

1431. PILE DE VOLTA. — Considérons un disque de cuivre c communiquant avec le sol, et sur lequel soit posé un disque de zinc z (*fig.* 1046). La force électromotrice agissant au contact n, poussera sur c du fluide négatif qui passera dans le sol, et sur z du fluide positif qui atteindra immédiatement le

on voit jaillir une étincelle, quand la distance est assez petite. Cette distance dépend de la tension ou du nombre des couples. On peut aussi reproduire cette étincelle aussi souvent que l'on veut.

1433. Pile isolée. — Dans tout ce qui précède, nous avons supposé la pile en communication avec le sol par l'un de ses pôles. Supposons-la maintenant, isolée. Pour trouver la distribution de l'électricité entre les divers couples, il suffira de considérer deux piles égales non isolées, commençant en bas, l'une par le cuivre, et l'autre par le zinc. La première contiendra du fluide positif, et la seconde du fluide négatif. Si l'on renverse cette dernière, de manière que son zinc inférieur vienne s'appliquer sur le cuivre qui est au bas de la première, en ayant soin de séparer ces deux disques par une rondelle de drap, on formera une pile unique dont tous les disques se trouveront dans le même ordre, et dont une moitié sera chargée d'électricité positive, et l'autre d'électricité négative; car les disques du milieu étant à l'état neutre, il n'y aura rien de changé dans l'état électrique de tous les autres. On voit que la tension aux deux pôles ne sera que la moitié de la tension qui aurait lieu à l'une des extrémités d'une pile non isolée ayant le même nombre de couples.

Si l'on met la pile isolée en activité, les phénomènes se passeront dans chaque moitié comme dans la pile non isolée; seulement les fluides, en même quantité, qui arriveront dans la rondelle du milieu, s'y neutraliseront, au lieu de passer dans le sol. Du reste, quand la pile non isolée est en activité, l'électricité ne tarde pas à s'y distribuer, comme dans la pile isolée; c'est-à-dire que les deux moitiés renferment des électricités contraires, et que la rondelle qui se trouve au milieu est à l'état naturel.

1434. Différentes espèces de piles. — La pile, telle que nous l'avons décrite (*fig.* 1048), se nomme *pile à colonne*. Elle présente divers inconvénients : elle est longue à monter, et le poids des disques comprime les rondelles et en exprime le liquide. On a imaginé diverses dispositions destinées à rendre l'appareil plus commode et à augmenter son énergie.

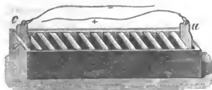


Fig. 1049. — 1/6.

Pile à auge, ou de Cruikshank. — Les couples de cette pile sont formés de deux plaques rectangulaires en zinc et en cuivre, appliquées et soudées l'une sur l'autre. Ces doubles plaques sont placées parallèlement les unes aux autres, de manière que le zinc soit toujours tourné d'un même côté, dans une auge en bois qu'elles divisent en compartiments égaux (*fig.* 1049). Un mastic résineux sert à fixer les couples et à les isoler les uns des autres. On remplit les compartiments d'eau acidulée, et des lames de cuivre *a* et *c*, munies de fils métalliques, reçoivent les électricités accumulées dans les compartiments extrêmes. Le pôle positif se trouve en *a* du côté du zinc. Quand on ne veut

plus faire usage de cette pile, on verse l'eau acidulée, et on lave les couples à grande eau.

Pile à couronne de tasses. — Chaque couple de cette pile, imaginée par Volta, se compose d'une bande métallique repliée en forme de fer à cheval, et formée de zinc *z* (*fig.* 1050), et de cuivre *c*, soudés l'un à l'autre en *o*. Des *tasses*, placées les unes à la suite des autres, contiennent de l'eau acidulée, et chacune d'elles reçoit une branche cuivre et une branche zinc, appartenant à deux couples voisins. Ces branches, qui ne doivent pas se toucher, communiquent par l'eau acidulée. Les électricités qui s'accumulent dans les vases extrêmes sont reçues par des lames de cuivre. Avec une centaine de couples, on éprouve des commotions assez fortes, quand on plonge les doigts dans les vases extrêmes.

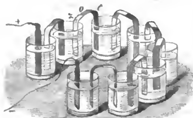


Fig. 1050.

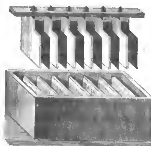


Fig. 1051.

La pile à couronne est très facile à construire, mais elle est longue à monter. Pour simplifier l'opération, on fixe les couples, par leur partie supérieure, à une barre de bois (*fig.* 1051), et on les plonge dans une auge partagée en compartiments égaux isolés, de manière que chaque compartiment reçoive une lame de zinc et la lame de cuivre du couple suivant. En 1806, l'Institut royal de Londres fit établir dans ce système une batterie voltaïque de 2000 couples, célèbre par les expériences de Davy. Les éléments avaient 4 ou 5 décimètres carrés; la batterie était formée de 200 auges et renfermée dans une cave, dont les électrodes traversaient la voûte, afin que les expérimentateurs ne fussent pas incommodés par l'hydrogène qui se dégageait d'un aussi grand nombre d'éléments, par l'action de l'acide sulfurique sur le zinc. M. Children a fait construire dans ce même système, une pile remarquable par l'intensité de ses effets, composée de 20 couples de 1 mètre carré de surface environ.

Pile de Wollaston. — Wollaston ayant reconnu qu'il y a beaucoup d'avantage à donner au cuivre une plus grande surface qu'au zinc, a recourbé la lame de cuivre de manière à envelopper la lame de zinc comme on le voit en *ccc* (*fig.* 1052). La lame de zinc *z* est soudée au cuivre *c'* de l'élément

suivant : elle est séparée du cuivre *cee* par de petits morceaux de bois placés en haut et en bas. La lame de cuivre est fendue en dessous, pour que le liquide dans lequel plonge le couple puisse circuler facilement autour de la lame de zinc *z*. La *fig.* 1053 représente l'ensemble d'une pile de Wollaston de 28 couples. Ces couples sont fixés en deux rangées, sur les barres de bois *aa*, *bb* que l'on peut élever ou abaisser à volonté, au moyen de chaînes qui passent sur des poulies de renvoi et viennent s'enrouler sur un treuil *t*, que l'on fait mouvoir au moyen de la manivelle *m* et d'un système d'engrenage. Quand on abaisse les couples, chacun d'eux plonge dans un vase plein d'eau acidulée. Tantôt les deux séries forment une pile de 28 éléments pliée en deux; alors les deux pôles sont d'un même côté de l'appareil; tantôt elles forment une pile de 14 éléments, d'étendue double, et alors les deux pôles sont aux extrémités opposées, et les éléments sont tournés de la même manière dans les deux séries.

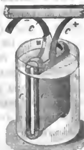


Fig. 1052.

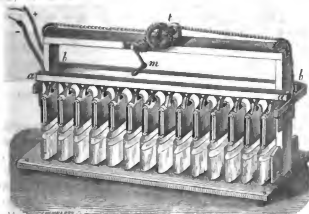


Fig. 1053.

Pile en hélice. — Quand on a besoin d'éléments à très grande surface, on emploie la *pile en hélice*, imaginée par Hare. Pour construire un élément de cette pile, on enroule en spirale autour d'un cylindre de bois *r*, *r* (*fig.* 1054), une lame de zinc et une lame de cuivre, en ayant soin de les séparer par des bandes de drap, ou par des baguettes en osier. De cette manière, les deux faces de la lame de zinc se trouvent, dans presque toute leur étendue, en présence d'une surface de cuivre, et réciproquement, comme on le voit dans la coupe transversale *or*, où la ligne forte représente le zinc. Quand on veut se servir de

cet élément, on le plonge dans un tonneau rempli d'eau acidulée. Les lames de zinc et de cuivre sont munies de fils f, f'. En o est le contact des deux métaux; la lame de cuivre c est destinée, dans la théorie de Volta, à recueillir l'électricité qui se porte sur le zinc, et qui passe sur cette lame c à travers l'eau acidulée. Quand on veut réunir plusieurs couples, on fait communiquer, au moyen de larges bandes de cuivre, le zinc de chacun d'eux avec le cuivre du suivant, et ainsi de suite. Ces couples sont fixés à des barres de bois, que l'on élève ou que l'on abaisse à volonté, au moyen d'un treuil disposé d'une manière analogue à celui de la *fig.* 1053. Hare a construit un appareil semblable, qu'il a nommé *calorimoteur* ou *déflagrateur*, à cause de l'intensité de ses effets calorifiques. M. Pouillet a fait construire, pour la Faculté des sciences de Paris, une pile en hélice de 12 couples, dont les lames ont chacune 5 ou 6 mètres carrés de surface. Les couples sont fixes, et c'est le plancher portant des seaux pleins d'eau acidulée, qui se soulève, au moyen de chaînes, de manière que les couples soient baignés par le liquide.

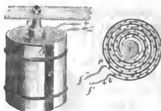


Fig. 1054.

Pile d'Young. — Cette pile, qui peut renfermer un grand nombre d'éléments dans un petit espace, et dont le principe est dû à M. Faraday, est composée de lames de zinc et de cuivre découpées et repliées comme on le voit en z, z', c, c' (*fig.* 1055), où les lames de cuivre sont ombrées, pour les distinguer des lames de zinc. Chaque lame de zinc porte un appendice, qui est soudé à un appendice semblable de la lame de zinc suivante, comme on le voit en o. Les lames sont engagées les unes dans les autres, de manière que chaque zinc se trouve entre deux cuivres, et réciproquement. On peut rapprocher les lames de manière que 50 couples n'occupent pas plus de 25^{cm}. On voit en A l'ensemble de cette pile; on la plonge toute entière dans une même auge, où elle fonctionne bien quand les pôles sont réunis par un fil conjonctif; ce qui est contraire à la théorie de Volta, qui attribue au liquide le rôle unique de conducteur. Cependant, les quantités d'électricités qui se recombinent à travers le fil conjonctif, sont un peu moindres que si les éléments plongeaient dans des vases séparés. Ces remarques s'appliquent à l'appareil suivant.

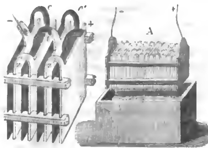


Fig. 1055.

Pile de Muncke. — Cette pile, bien plus simple que la précédente, présente les mêmes avantages. Les lames de zinc et de cuivre, dont on voit une coupe horizontale en *c z c z* (*fig.* 1056), sont soudées suivant une ligne verticale, et pliées en forme d'U; elles sont maintenues en dessus et en dessous par une ou plusieurs petites barres de bois, comme on le voit dans le dessin de gauche, qui représente l'ensemble de l'appareil. Les piles d'Young et de Muncke sont très commodes, et les plus avantageuses quand on a besoin d'un grand nombre d'éléments. On peut réunir facilement plusieurs de ces piles, en faisant communiquer les extrémités, au moyen de bandes de cuivre qu'on réunit par de petites pinces à vis.

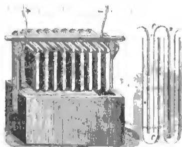


Fig. 1056.

On a construit des piles dans lesquelles l'un des métaux sert à former le vase qui contient l'eau acidulée. Nous allons décrire deux de ces piles.

Pile d'Œrsted. — Des vases aplatis en cuivre *c*, *c*, *c*; *c'* (*fig.* (1057)), contiennent de l'eau acidulée, dans laquelle plongent, sans toucher le cuivre, des lames de zinc *z*, *z*, *z*; *z'*. Chaque vase de cuivre communique avec le zinc qui plonge dans le vase suivant, par des crochets s'enfonçant dans de petits godets en fer *n*, *n'*, remplis de mercure. Il suffit de soulever ou d'abaisser la barre de bois B, B', à laquelle sont fixées les lames de zinc, pour faire fonctionner la pile, ou la mettre au repos.

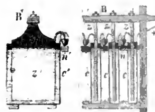


Fig. 1057.

Pile de Sturgeon. — La figure 1058 représente un des couples de cette pile. L'eau, acidulée par $\frac{1}{8}$ d'acide sulfurique, est contenue dans un vase cylindrique en fonte de fer *f*. Dans ce vase est plongé un cylindre en zinc *z*, qui s'appuie sur une rondelle de bois. Des tiges en cuivre sont vissées au cylindre de zinc et au vase de fonte; la première va s'adapter au vase de fonte du couple précédent. — M. Callan a imaginé, de son côté, un couple qui ne diffère de celui-ci que par la forme, qui est aplatie au lieu d'être cylindrique; parmi les liquides qu'il emploie, nous citerons l'acide chlorhydrique, et l'acide sulfurique étendu de 3 ou 4 parties d'une dissolution concentrée de sel marin.



Fig. 1058. - 1/6

On préfère aujourd'hui, aux appareils que nous venons de décrire, des piles à *deux liquides*, que nous décrirons, après avoir parlé de l'électricité dégagée dans les actions chimiques. Nous reviendrons alors sur les piles à un seul liquide, pour montrer l'origine véritable de l'électricité qu'elles fournissent.

1435. Batterie voltaïque. — En réunissant plusieurs piles semblables, on forme une *batterie voltaïque*, ou *batterie galvanique*. Il y a deux manières de procéder : 1° on met les piles les unes à la suite des autres, de manière à tourner tous les pôles positifs du même côté, et l'on réunit, au moyen d'arcs métalliques, les pôles voisins. On voit en A (*fig.* 1059) comment on effectue cette réunion avec les piles à auges; les arcs sont terminés par des lames, qui plongent dans les compartiments extrêmes des auges voisines. L'ensemble forme alors une pile ayant un nombre de couples égal à la somme des couples de toutes les auges. 2° On place des piles égales, parallèlement, les unes à côté des autres, de manière que le zinc soit dans toutes du même côté, et l'on fait communiquer entre eux tous les pôles positifs, et entre eux tous les pôles négatifs, au moyen d'arcs métalliques. On voit, en *abcr*, un arc semblable réunissant les pôles de même nom de trois auges parallèles. On a alors une pile dont les couples sont en même nombre que dans chaque auge, mais dont la surface est triple de celle de l'élément d'une des auges. Nous verrons plus loin que, suivant les effets que l'on veut produire, il importe d'avoir, tantôt de grands éléments, tantôt de nombreux éléments. L'Ecole polytechnique possédait une batterie voltaïque, composée de 6 piles à auge ayant 100 couples chacune, de 9 décimètres carrés, avec laquelle Gay-Lussac et Thénard ont fait, en 1808, des expériences importantes que nous ferons connaître.

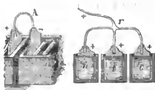


Fig. 1059.

1436. — Piles sèches. — Le liquide qui entre dans la composition de la pile voltaïque exerce sur les métaux une action corrosive qui les détruit rapidement. C'est pourquoi on a cherché à remplacer ce liquide par un conducteur sec non métallique; mais on n'a obtenu ainsi que des piles très faibles. Les premiers essais ont été faits par Hachette et Desormes, vers 1802. Ils empilaient des disques minces de zinc et de cuivre, séparés par une couche de colle d'amidon. M. Biot a remplacé la colle, par des disques de salpêtre fondu. Deluc forma ensuite des piles sèches au moyen de disques très minces de zinc et de papier cuivré pressés les uns contre les autres ; le papier formait le conducteur intermédiaire entre les deux métaux. Plus tard, en 1812, Zamboni construisit les piles sèches, qui portent son nom.

Pour construire une pile dans le système de Zamboni, on colle une feuille

d'étain sur une feuille de papier un peu humide [1], et l'on recouvre la face opposée, d'une couche de peroxyde de manganèse en poudre, que l'on fait adhérer en frottant avec un bouchon. On superpose plusieurs feuilles ainsi préparées, en mettant l'étain toujours du même côté, puis on enlève, avec un emporte-pièce, des groupes de rondelles qu'on superpose, toujours dans le même ordre, de manière à réunir plusieurs milliers de couples. On place aux extrémités de cette pile des disques épais de cuivre et de zinc, que l'on presse et que l'on maintient par des cordons de soie attachés, pendant la pression, à de petits crochets. On plonge ensuite la pile dans du soufre ou de la gomme laque en fusion, dont elle se trouve enveloppée, ce qui la préserve du contact de l'air. Ces piles, même avec un très grand nombre d'éléments, ne donnent que de très faibles résultats. Au bout de quelques années, elles cessent de fournir de l'électricité. Cependant, M. Delezenne en a construit qui conservaient encore leur activité au bout de 28 ans.

Peltier et M. Delezenne, chacun de leur côté, ont établi des piles sèches à grands éléments pouvant donner des commotions, et produire des étincelles et des effets chimiques. Le premier ne réunissait qu'un petit nombre de couples pour diminuer l'inconvénient de l'imparfaite conductibilité du papier, qu'il prenait, du reste, assez humide. M. Delezenne empile des feuilles de papier cuivré et de papier étamé, de manière que le cuivre s'appuie sur l'étain; ou bien des feuilles étamées garnies, du côté non étamé, d'une couche de peroxyde de manganèse appliquée avec de la colle de gélatine [2]. Une pile de 300 couples, convenablement comprimés et dont le papier est suffisamment humide, donne des commotions qui se font sentir jusqu'au poignet, décompose l'eau, et dévie l'aiguille aimantée quand on fait communiquer les couples extrêmes avec les fils d'un réomètre; effets qui diminuent à mesure que la pile perd de son humidité.

1437. Applications. — On a tiré parti de la tension qui existe aux pôles des piles sèches, pour produire différents effets d'attractions et de répulsions électriques, au moyen de petits appareils de formes très variées; il nous suffira d'en citer un. On dispose verticalement deux piles de Zamboni *ab*, *cd* (*fig.* 1060), dont les pôles sont opposés, et qui communiquent entre elles par leur partie inférieure. Un pendule *on*, dont la balle isolée vient toucher alternativement les boutons électrisés *a* et *c*, oscille continuellement de l'un à l'autre. On a fait à Munich et à Vérone de petites horloges dans lesquelles le mouvement du pendule, produit par

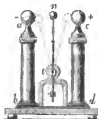


Fig. 1060. — 1/6.

[1] Quelquefois le papier est imbibé d'huile, de miel, de lait, d'une dissolution légèrement salée, d'essence de térébenthine... La pile est alors plus forte dans les premiers temps, mais elle perd plus rapidement son énergie, que celles dont le papier n'a pas été préparé.

[2] *Mémoires de la Société de Lille*, et *Archives de l'électricité*, t. V, p. 67.

l'électricité, se transmettait à des aiguilles, par l'intermédiaire de rouages ; mais l'intensité des piles sèches variant avec l'humidité et la température, et allant en décroissant peu à peu, le mouvement était très irrégulier.

Electroscope de Bohnenberger. — Si l'on suspend entre deux piles sèches égales, disposées comme celles de la *fig.* 1060, une feuille d'or placée à égale distance des boutons *a* et *c*, on aura un électroscope extrêmement sensible ; car la moindre électricité fournie à la feuille d'or, rompant l'équilibre, la fera s'incliner vers le bouton électrisé d'une manière contraire. La *fig.* 1037 représente cet électroscope. Une cloche de verre préserve la feuille d'or, des agitations de l'air. On a reproché à cet instrument d'être infidèle, parce que la feuille d'or est en équilibre instable ; mais avec des précautions, l'inertie de l'air suffit, à cause de la faible masse de la feuille d'or, à la maintenir en repos, tant qu'elle n'est pas électrisée.

Diagomètre de Rousseau. — Cet instrument (*fig.* 1061) est destiné à comparer la conductibilité des liquides. *ns* est une faible aiguille aimantée portant un disque de clinquant *n*, et très mobile sur un pivot *o* isolé sur un plateau de résine. Du pied de ce pivot part un conducteur *oc*, qui porte une coupe *c* et un disque métallique *r*. On place *oc* dans le méridien magnétique, de manière que le disque *n* touche le disque *r*. P est une pile sèche non isolée, que l'on fait communiquer par un fil avec le liquide contenu dans la coupe *c*. Quand ce liquide est bon conducteur, l'électricité le traverse, les disques *n* et *r* reçoivent la même électricité, et l'aiguille s'écarte de manière à arriver immédiatement au maximum de déviation. Si, au contraire, le liquide est imparfaitement conducteur, la déviation augmente peu à peu, et l'on peut en suivre les accroissements, sur une division que porte la cloche de verre qui abrite l'instrument. Le temps que met l'aiguille à atteindre son maximum de déviation, donne une idée de la conductibilité du liquide. M. Rousseau a trouvé ainsi que l'huile d'olive pure conduit à peine l'électricité, tandis que l'huile de graines conduit bien ; tellement qu'une très petite quantité mêlée à l'huile d'olive peut être décelée. M. Rousseau a encore constaté que les charbons qui conviennent le mieux dans la fabrication de la poudre sont ceux qui conduisent le moins bien l'électricité.

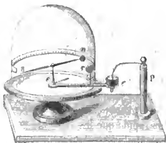


Fig. 1061.

1138. EFFETS PRODUITS PAR LE COURANT FOURNI PAR LA PILE. — Le conflit électrique qui a lieu dans le fil métallique qui réunit les deux pôles d'une pile se nomme *courant électrique* ou *courant voltaïque*. On nomme *circuit*, la série de conducteurs non interrompus formée par la pile et par les corps qui établissent la communication entre ses deux pôles. Le circuit est dit *ouvert* quand il

y a une interruption que ne peut franchir l'électricité ; dans le cas contraire, il est *fermé*.

Sens du courant. — Les deux électricités accumulées aux pôles de la pile vont l'une vers l'autre à travers le circuit. On ne peut donc dire que le courant marche dans un sens plutôt que dans le sens opposé. Cependant, pour indiquer de quel côté se trouve le pôle positif de la pile, on est convenu d'appeler *sens du courant*, le sens dans lequel marche l'électricité positive. On dit donc que *le courant va du pôle positif au pôle négatif ;* mais il ne faut voir là qu'une manière conventionnelle de s'exprimer.

Les courants voltaïques produisent sur les corps qu'ils traversent, ou près desquels ils passent, différents effets que nous étudierons plus tard en détail, mais que nous allons dès à présent énumérer. Ces effets se distinguent, en effets *physiologiques*, *physiques*, *chimiques* et *magnétiques*.

1° Les *effets physiologiques* consistent dans les commotions produites, soit sur les cadavres des animaux, soit sur les animaux vivants. Ces effets sont d'autant plus intenses que la pile possède un plus grand nombre de couples.

2° Les *effets physiques* sont de plusieurs sortes ; par exemple, si l'on met entre les extrémités des électrodes, un fil métallique suffisamment fin et court, ce fil rougit, fond, ou même se volatilise, suivant la puissance de la pile. Ces effets dépendent surtout de la grandeur des éléments ; un seul couple à grande surface est plus efficace que 100 couples de petites dimensions.

3° Les *effets chimiques* se manifestent quand le courant traverse un corps composé, liquide, ou en dissolution. Ce corps peut être décomposé. Les résultats dépendent ici, à la fois, du nombre et de la grandeur des éléments ; il en faut un certain nombre pour vaincre l'affinité chimique et pour que la décomposition commence, et une fois ce nombre réalisé, la décomposition est d'autant plus rapide que les éléments ont une plus grande surface. M. Faraday a donné le nom d'*électrolyte* au liquide soumis à l'action décomposante du courant. Le premier cas de décomposition qu'on ait observé est celui de l'eau. En 1800, Carlisle et Nickolson, ayant monté une pile à colonne avec des disques de zinc et d'argent, sentirent une odeur analogue à celle que produit le gaz hydrogène tel qu'il se dégage d'un mélange d'eau, d'acide sulfurique et de zinc. Ayant alors fait passer le courant à travers de l'eau, ils virent du gaz hydrogène se dégager au pôle positif, et des traces d'oxydation se manifester au pôle négatif.

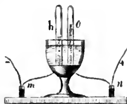


Fig. 1062.

Voltamètre. — Pour faire passer le courant de la pile à travers l'eau, et la décomposer, on emploie aujourd'hui le petit appareil de la *fig.* 1062, désigné par M. Faraday sous le nom de *voltamètre*. Il consiste en un vase de verre, dont le fond est traversé par des fils ou de petites lames en platine. Ces fils sont isolés l'un de l'autre. On met leur partie extérieure en communication avec les élec-

trodes d'une pile; par exemple, en les enfonçant en *m* et *n*, avec ces derniers, dans du mercure. Le vase contient de l'eau à laquelle on ajoute, pour la rendre meilleure conductrice, quelques gouttes d'acide sulfurique, quand la pile n'a pas un grand nombre d'éléments. Dès que le circuit est fermé, on voit partir de chaque point des fils de platine, de petites bulles de gaz, que l'on recueille dans des éprouvettes en verre *o*, *h*, placées au-dessus. Ce qu'il y a de très remarquable, c'est que les éléments de l'eau se dégagent séparément. L'oxygène apparaît seul en *o*, sur le fil qui apporte l'électricité positive, et l'hydrogène seul en *h*, sur celui qui apporte l'électricité négative. C'est ainsi que l'eau fut, pour la première fois, décomposée, et que ses éléments furent recueillis séparément. En *h*, on trouve deux fois plus de gaz qu'en *o*, ce qui montre que l'eau est formée de 2 volumes d'hydrogène pour 1 volume d'oxygène. Pour reconnaître qu'il y a de l'oxygène en *o*, on retourne l'éprouvette, et l'on y plonge une allumette qui présente quelques points en ignition; elle se rallume aussitôt. En approchant une flamme, de l'ouverture de l'éprouvette *h*, après y avoir introduit un peu d'air, on entend une petite détonation qui prouve la présence de l'hydrogène.

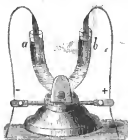


Fig. 1063.

Parmi les effets chimiques des courants, nous citerons encore la décomposition des sels, découverte, en 1803, par Berzélius et Hisinger. L'expérience se fait au moyen d'un tube en U (*fig.* 1063), dans lequel on met le sel en dissolution. Des lames de platine accrochées aux électrodes de la pile, plongent dans les branches *a* et *b*, et le sel est décomposé. S'il s'agit d'un sel à base alcaline, l'acide se rend en *b* au pôle positif, avec l'oxygène de l'eau décomposée, et la base, en *a* au pôle négatif, avec l'hydrogène. Si l'on emploie une dissolution d'un sel neutre, comme le sulfate de potasse, colorée en bleu par le sirop de violette, on la verra rougir en *b*, et devenir verte en *a*.

Si la base n'est pas alcaline, le métal de la base se dépose au pôle négatif, et son oxygène se porte au pôle positif, avec l'acide.

Corps électro-positifs et électro-négatifs. — Dans les décompositions produites par les courants, on donne le nom de corps *électro-positifs* à ceux qui se rendent au pôle *négatif*, et de corps *électro-négatifs*, à ceux qui se rendent au pôle *positif*. Ainsi, l'hydrogène de l'eau est électro-positif, et l'oxygène, électro-négatif. L'acide des sels est *électro-négatif*, et la base, *électro-positive*. Ces dénominations viennent de ce que l'on suppose que les molécules qui entrent dans un composé, sont naturellement électrisées; et comme les électricités contraires s'attirent, ce sont les molécules électrisées positivement ou électro-positives qui sont sollicitées vers le pôle négatif de la pile, et réciproquement. Du reste, une même substance peut être *électro-positive* ou *électro-négative*, suivant la nature de celle avec laquelle elle est combinée. Nous

reviendrons sur ce sujet important, quand nous nous occuperons en particulier des effets chimiques produits par les courants.

1439. Effets magnétiques des courants. — Si l'on dispose un fil métallique traversé par un courant, parallèlement à une aiguille aimantée mobile sur un pivot, elle quitte le méridien magnétique et se met en croix avec le courant. C'est là l'expérience célèbre d'Œrsted, qui la fit pour la première fois en 1819. Si l'aiguille est astatique, elle se place perpendiculairement au courant; dans le cas contraire, comme elle est sollicitée par l'action terrestre, elle s'approche d'autant plus de la position perpendiculaire, que les éléments de la pile qui fournit le courant sont plus étendus. Ce phénomène donne le moyen de comparer les intensités des courants; il permet aussi de reconnaître facilement si un fil de métal est parcouru par un courant.

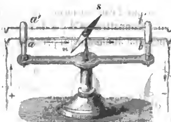


Fig. 1064.

Quand on change le sens du courant, l'aiguille se retourne bout à bout. On obtient le même résultat, quand, sans changer le sens du courant, on fait passer le fil métallique qui était au-dessus du centre de l'aiguille, au-dessous, et réciproquement. La *fig.* 1064 représente un appareil au moyen duquel on fait facilement ces diverses expériences. Les fils *ab*, *a'b'*, qui passent l'un au-dessus, l'autre au-dessous de l'aiguille aimantée *ns*, sont isolés l'un de l'autre, par des colonnes de verre *aa'*, *bb'*. En accrochant aux deux bouts d'un de ces fils les électrodes de la pile, on peut faire passer le courant, dans quatre conditions différentes : au-dessus ou au-dessous de l'aiguille, de droite à gauche ou de gauche à droite.

Ampère est parvenu à réunir les divers résultats en un seul énoncé : il suppose un observateur couché le long du courant, regardant l'aiguille aimantée, et placé de manière que le courant entre par ses pieds et sorte par sa tête, et il nomme *droite* et *gauche du courant*, la droite et la gauche de l'observateur ainsi placé. Cela posé, l'expérience montre que, dans tous les cas, le pôle *nord* ou pôle *austral* (1205) de l'aiguille aimantée se tourne à la *gauche* du courant. Ainsi, dans le cas de la *fig.* 1064, on voit que le pôle nord de l'aiguille viendra en *n*, en avant de la figure ; car l'observateur étant couché sur le dos, les pieds du côté de *a*, sa gauche sera en avant.

1440. Multiplicateur. — Pour rendre plus efficace l'action du courant sur l'aiguille aimantée, Schweigger a eu l'idée de faire passer le fil plusieurs fois autour de cette aiguille, en ayant soin de l'envelopper de soie ou de coton, pour que l'électricité ne puisse sauter d'un tour à l'autre. Les instruments construits d'après ce principe se nomment *multiplicateurs*. La *fig.* 1065 représente un de ces appareils; le fil enveloppé de soie est enroulé autour d'un cadre; en *a* et *b* sont les extrémités de ce fil. L'aiguille aimantée *ns* est suspendue

dans le cadre, que l'on a soin de placer dans le méridien magnétique. Chaque tour du fil produisant son effet, on voit que l'aiguille sera plus fortement déviée que s'il n'y avait qu'un tour, si toutefois les quatre parties de chaque tour *ab*, *bc*, *cd*, *da* (*fig.* 1066), concourent à pousser le pôle nord du même côté. Or, c'est ce qui a lieu ; car si le courant marche dans le sens des flèches, on voit, en appliquant la règle d'Ampère à chaque côté du rectangle, que le pôle nord sera poussé derrière le plan de la figure.

Du reste, il ne faudrait pas croire que la sensibilité de l'appareil augmente indéfiniment quand on multiplie le nombre des tours ; car l'électricité éprouve à parcourir le circuit, une résistance qui augmente avec sa longueur. Ce n'est



Fig. 1065.

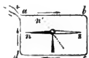


Fig. 1066.



Fig. 1067.

donc que lorsque l'électricité présente une assez forte tension, qu'on peut impunément augmenter beaucoup le nombre des tours.

Multiplicateur à deux aiguilles. — Pour rendre l'action du courant plus efficace, il faut se servir d'une aiguille très forte, et en même temps diminuer l'action magnétique du globe sur cette aiguille. Pour remplir ces deux conditions, en apparence inconciliables, Nobili emploie deux aiguilles parallèles *ns*, *n's'* (*fig.* 1067), fixées invariablement l'une à l'autre, de manière que les pôles contraires soient d'un même côté (1208). On donne à ces aiguilles à peu près la même force, de manière que le magnétisme terrestre n'ait sur le système qu'elles forment qu'une faible action. Ce système est suspendu par un fil de soie sans torsion *f*, de manière que l'une des aiguilles soit dans l'intérieur du cadre, et l'autre en dessus. La tige *t*, qui les lie entre elles, passe librement dans un tube de verre vertical qui traverse le haut du cadre. Il est facile de voir que la partie *ab* du courant pousse du même côté, derrière le plan de la figure, les pôles *n* et *s'*. Quant aux parties *bc*, *cd*, *da*, elles tendent à amener *s'* en avant ; mais l'expérience montre que leur action, à cause de la plus grande distance, est moindre sur *n's'* que l'action de la partie *ab* seule. De sorte que la déviation est bien plus grande que s'il n'y avait qu'une seule aiguille *ns* ; l'action de la terre étant très faible, et celle du courant s'exerçant à la fois sur les deux aiguilles, et avec une grande intensité, parce qu'elles peuvent être individuellement très fortes.

1441. Rhéomètres ou galvanomètres. — Ordinairement, on adapte au-dessous de l'aiguille supérieure, un cadran divisé qui permet d'en mesurer les déviations. Ce cadran est fixé au cadre de manière que le diamètre qui passe par le zéro soit parallèle au plan du cadre, plan que l'on place toujours dans

le méridien magnétique. L'appareil porte alors le nom de *réomètre* ou *galvanomètre*, parce que l'intensité du courant peut se déduire de l'angle de déviation.

La *figure* 1068 représente un réomètre à deux aiguilles, imaginé par M. E. Becquerel, pour l'usage des cours publics. Le fil enveloppé de soie est enroulé sur deux cadres parallèles et verticaux *a*, *a'*; ses extrémités aboutissent en *o* et *o'*; les deux aiguilles aimantées tournent sur le tranchant d'un couteau horizontal en bronze, qui sert à les réunir, et est disposé comme le couteau des balances. Un brin de paille *e*, fixé à l'aiguille antérieure, parcourt les divisions d'un arc à grand rayon; il est équilibré par un contre-poids en forme d'écrou, qui s'enfonce plus ou moins dans une vis placée à l'extrémité opposée de l'aiguille aimantée. On dispose ce contre-poids de manière que le système des aiguilles se tienne de lui-même verticalement.

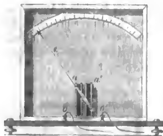


Fig. 1068.

Réomètre différentiel. — Cet instrument sert à comparer les intensités de deux courants; il ne diffère des réomètres ordinaires qu'en ce qu'il y a deux fils enroulés autour du cadre. Ces deux fils sont aussi identiques que possible, et, pour qu'ils soient distribués de la même manière sur le cadre, on les tord bien régulièrement l'un avec l'autre, et on les enroule ensemble. Pour comparer deux courants, on les fait passer *en sens contraire* dans ces deux fils, qu'il est facile de reconnaître parce qu'ils sont garnis de soie de différente couleur. Le sens de la déviation de l'aiguille, indique quel est le courant le plus intense, et la grandeur de cette déviation sert à mesurer la différence.

Nous décrirons plus tard en détail les divers réomètres dont on fait usage; il nous suffit pour le moment de savoir comment on peut constater l'existence de faibles courants au moyen du multiplicateur.

1142. ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE. — L'électricité qui circule dans le fil conjonctif de la pile doit à son état de mouvement, des propriétés particulières toutes différentes de celles de l'électricité statique. C'est ainsi que celle-ci, quelque grande que soit sa tension, est impuissante à produire des décompositions et à dévier l'aiguille aimantée. On a donné le nom d'*électricité dynamique* au fluide en mouvement dans le fil conjonctif. Ce fluide ne se porte pas à la surface des conducteurs, mais il est en égale quantité dans tous les points de la section, comme nous le prouverons plus tard. De plus, l'intensité et les propriétés du *courant* sont les mêmes dans tous les points du fil conjonctif, près des pôles de la pile comme à une très grande distance, et cette distance dépasse souvent des milliers de kilomètres, comme dans les télégraphes électriques. Par exemple, une même aiguille aimantée soumise à l'action du courant dans les mêmes conditions, est partout déviée de la même quantité; plusieurs volta

mètres identiques (1438) placés aux différents points du circuit contiennent, au bout du même temps, des quantités égales d'hydrogène. On ne peut donc pas considérer les fluides qui partent des pôles de la pile, comme se transportant l'un vers l'autre dans le fil conjonctif; car, alors, il y aurait beaucoup de fluide positif ou négatif près des pôles, et rien ou presque rien, vers le milieu du fil conjonctif; les effets ne pourraient donc pas être les mêmes dans tous les points du circuit. La théorie de la polarité électrique rend compte de la manière la plus heureuse de tous ces résultats : le courant consiste dans une suite continue de décharges intermoléculaires, analogues à celles que nous montrent les tubes étincelants, et qui ont lieu de la même manière, dans toutes les sections du conducteur, et dans toute l'étendue d'une même section.

Colladon a montré que l'électricité des machines ordinaires peut aussi produire des courants ; par exemple, quand on réunit, par un fil métallique, les conducteurs et les coussins d'une machine de Ramsden; mais la quantité d'électricité fournie à chaque instant est tellement petite, qu'il faut, pour que le courant produise quelques effets, employer des machines très puissantes, comme les machines hydro-électriques. Celle de l'Institut polytechnique de Londres fournit un courant qui décompose l'eau et les sels, et dévie de 25° environ l'aiguille aimantée d'un multiplicateur à 60 tours. Le fil qui porte le courant part de la chaudière et s'enfonce dans un puits. Le courant va du puits à la chaudière, qui est électrisée négativement ; ce qui s'explique facilement quand on considère le courant comme formé de décharges intermoléculaires. Nous avons vu aussi, l'électricité de l'atmosphère dévier l'aiguille du réomètre (1401).

Les piles donnent de très grandes quantités d'électricité, mais leur tension est faible, à moins qu'on n'emploie un très grand nombre d'éléments. Aussi peut-on tenir impunément avec les mains, les électrodes des piles composées d'une dizaine de couples, l'épiderme sec isolant suffisamment pour les faibles tensions qu'elles produisent. Nous verrons aussi que, dans une foule d'appareils, le bois, l'ivoire, le carton, isolent assez pour empêcher l'électricité de quitter les électrodes.

II. Dégagement de l'électricité dans les actions chimiques.

1443. ÉLECTRICITÉ PRODUITE DANS LES COMBINAISONS. — L'idée de rechercher de l'électricité dans les actions chimiques, est antérieure à la découverte de Galvani. On y fut amené naturellement en remarquant que le frottement produit de la chaleur, en même temps que de l'électricité, et que les actions chimiques forment la source de chaleur la plus abondante. Laplace et Lavoisier, en 1781, tirèrent des étincelles d'un condensateur de Volta, mis en communication avec un vase dans lequel ils faisaient agir de l'acide sulfurique sur du fer

ou de la craie. Mais l'effervescence qui se produisait occasionnait des frottements auxquels on pouvait attribuer l'electricité dégagée. Plus tard, Volta chargea son électromètre condensateur, avec de l'électricité dégagée dans la combustion du charbon. Aprés la découverte de la pile, l'invention du multiplicateur vint fournir aux expérimentateurs un nouvel instrument, au moyen duquel Œrsted prouva qu'il se dégage de l'électricité dans l'action d'un acide sur un métal. M. Becquerel découvrit ensuite l'électricité dégagée dans les combinaisons des acides et des bases, et dans une foule d'autres réactions chimiques. Depuis, plusieurs physiciens, parmi lesquels nous citerons MM. Faraday, A. de La Rive, Becquerel, Avogrado, Matteucci, Nobili, ont rassemblé une masse de faits qui permettent de considérer le phénomène comme général.

Pour reconnaître le dégagement de l'électricité dans les actions chimiques, on opére tantôt avec l'électromètre à condensateur, tantôt avec le multiplicateur ; quelquefois on se sert de membres frais de grenouille. Dans ces expériences, on se préoccupe surtout d'éviter toute disposition qui pourrait faire supposer que l'électricité recueillie est produite par *le contact*. Il faut aussi avoir soin que les corps mis en présence soient l'un et l'autre bons conducteurs ; autrement le fluide qui se porterait sur le mauvais conducteur ne trouvant pas d'écoulement, détruirait celui que recevrait l'autre corps, et l'on n'obtiendrait aucun résultat. Du reste, on ne recueille ordinairement qu'une très petite portion des fluides séparés, la plus grande partie se recombinant aux surfaces mêmes où se produit l'action chimique. — Avant d'entrer dans le détail des expériences, nous allons énoncer les lois générales auxquelles on est arrivé, telles qu'elles ont été résumées par M. Becquerel.

1° Quand deux corps se combinent, les substances qui s'unissent à l'oxygène, ou celles qui jouent le rôle de base, s'électrisent négativement tandis que l'oxygène ou les corps qui jouent le rôle d'acide prennent le fluide positif.

2° Dans les décompositions, l'électricité se distribue d'une manière inverse : les corps qui jouent le rôle de base emportent l'électricité positive, et ceux qui jouent le rôle d'acide emportent l'électricité négative.

Souvent, on indique la distribution de l'électricité, en disant que la substance qui reçoit le fluide *positif* est *négative*, et que celle qui prend le fluide *négatif* est *positive;* nous éviterons d'employer cette manière de s'exprimer, parce qu'elle n'est pas nécessaire, et qu'elle peut jeter de la confusion dans l'esprit.

Nous allons maintenant passer en revue les différentes classes d'actions chimiques : combustion, actions des dissolutions les unes sur les autres, actions des dissolutions sur les métaux.

1111. Combustion des solides. — Volta, le premier, a reconnu qu'il se dégage de l'électricité dans la combustion ; mais, dans sa manière de procéder, les résultats étaient incertains. M. Pouillet est parvenu à en obtenir de constants par le moyen suivant [1] : un cylindre de charbon *c* (*fig.* 1069), allumé

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXXV, p. 401.

seulement à sa partie supérieure, est posé sur une lame fixée à l'un des plateaux d'un électromètre condensateur, dont l'autre plateau communique avec le sol. On active la combustion en soufflant de l'air ou de l'oxygène avec une vessie. Le charbon prend l'électricité positive, et l'acide carbonique, le fluide *négatif*. Quand on veut recueillir ce dernier, on fait communiquer le charbon *c'*, avec le sol, et on le place au-dessous de la lame qui dépasse le plateau collecteur; l'acide carbonique dégagé rencontre cette lame et y dépose l'électricité positive qu'il emporte. — M. Gaugain a remarqué que l'on obtient instantanément le maximum de charge du condensateur. Il a aussi trouvé moyen d'obtenir des résultats certains, au moyen d'un fragment de charbon de forme quelconque et entièrement allumé. Il suffit de l'envelopper d'un grillage en platine distant de 3 ou 4 millimètres, au moyen duquel on enlève l'électricité du gaz chaud, pendant que le charbon, qui doit être bon conducteur, communique avec le plateau. C'est pour n'avoir pas employé cette précaution que Volta, qui mettait le charbon en fragments dans un petit réchaud, n'obtenait que des résultats incertains, et que Davy et de Saussure ne purent réussir en voulant répéter ses expériences. M. Matteucci a obtenu de bons résultats avec un charbon allumé dans toutes ses parties, mais sur lequel il projetait un courant d'air qui emportait l'acide carbonique.

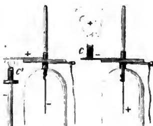


Fig. 1069.

Le soufre en combustion ne donne pas d'électricité au condensateur; c'est qu'il est mauvais conducteur. Il en est de même quand on fait brûler le charbon dans l'oxygène *sec*, après l'avoir attaché à un fil de platine communiquant avec le condensateur; et avec le zinc, le cuivre, l'étain, l'antimoine, se combinant avec le chlore sec. M. Matteucci en avait conclu, ainsi que de beaucoup d'autres observations sur les réactions des dissolutions, qu'il n'y avait pas dégagement d'électricité dans la combinaison de deux molécules élémentaires; mais M. Becquerel a combattu cette manière de voir, et il a montré que, dans le cas de la combustion, la cause de l'absence de résultats n'est autre que la mauvaise conductibilité des gaz secs [1].

On peut encore reconnaître l'électricité dégagée par la combustion du charbon, en plongeant l'extrémité d'un cylindre de plombagine artificielle, dans du salpêtre en fusion contenu dans un creuset en platine isolé. Le charbon et le creuset étant mis en rapport avec le fil d'un multiplicateur, l'aiguille aimantée est fortement déviée, de manière à indiquer que le charbon a reçu l'électricité négative.

1145. Combustion des gaz. — M. Pouillet a d'abord étudié l'électricité

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XVI, 257; XVII, 26, et XLII, 383.

dégagée dans la combustion du gaz hydrogène. Ce gaz sortait par un tube métallique non isolé, et la flamme était enveloppée d'une hélice en platine A (*fig.* 1070), communiquant avec l'un des plateaux du condensateur. Ce plateau se chargeait de fluide positif. Quand l'hélice, très étroite, était plongée dans le gaz hydrogène, qui occupe l'intérieur de la flamme, comme en B, le plateau recevait le fluide négatif. M. Mattencci et M. Gaugain ont montré que, pour obtenir des résultats certains, il faut en même temps faire communiquer avec le sol la couche gazeuse qui enveloppe la flamme. On voit, d'après ce qui précède, que, dans la combustion de l'hydrogène, ce gaz prend le fluide négatif, et que l'air, et la vapeur d'eau produite par la combustion, reçoivent l'électricité positive, qui peut être recueillie jusqu'à 10^{mm} de la flamme. Quand le tube de métal est isolé, il se charge de fluide négatif. M. Pouillet a aussi expérimenté sur la flamme de l'alcool, de l'éther, de la cire, des huiles, des graisses et de plusieurs substances végétales.

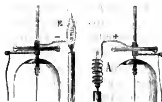


Fig. 1070.

M. Becquerel ayant constaté qu'il suffit de tenir dans la flamme, à des températures différentes, deux spirales en platine, pour obtenir un courant, on peut être induit en erreur dans les expériences destinées à reconnaître l'électricité de la flamme. Cependant, l'origine chimique de cette électricité n'en est pas moins prouvée par les expériences concordantes de M. Pouillet, et elle a été confirmée depuis par celles que nous allons rapporter.

M. Hankel mit le fil d'un réomètre en rapport avec une lampe métallique à alcool, et avec une lame de platine placée obliquement au-dessus de la flamme ; il obtint un courant allant de la lame à la lampe, par le réomètre. Il réussit également, en remplaçant la lame de platine par un conducteur humide, et même par la main mouillée. M. Buff a reconnu aussi qu'en plongeant les deux extrémités du fil d'un multiplicateur dans la flamme, le courant allait de l'extrémité la plus échauffée à l'autre extrémité ; mais, d'un autre côté, ayant mis un fil de platine dans la flamme, il chargea un condensateur, d'électricité positive quand le fil plongeait dans la partie extérieure, et d'électricité négative quand il plongeait dans l'intérieur. Or, ce fil devrait toujours prendre l'électricité positive, si l'effet était dû à la chaleur seule. Enfin, M. Grove plaça deux spirales de platine dans la flamme d'une lampe à alcool activée par le vent d'un chalumeau ; l'une des spirales était plongée dans la partie jaune de la flamme, et l'autre, dans la partie bleue tout près de l'orifice du chalumeau. Il obtint ainsi un faible courant qui allait de la première spirale, qui était la plus chaude, à celle qui était près de l'orifice. Mais ayant éloigné la première, de manière qu'elle fût plus froide que l'autre, le sens du courant ne fut pas changé ; ce qui montre qu'il n'était pas dû à l'inégal échauffement des deux spirales.

1446. Electricité produite par la réaction des dissolutions. — C'est à M. Becquerel qu'est due la découverte de l'électricité dégagée par les dissolutions qui agissent chimiquement les unes sur les autres. Nous allons examiner les principaux cas qui se présentent [1].

1° Formation des sels. — Quand un acide et une base se combinent, il y a production des deux électricités ; l'*acide* prend l'électricité *positive*, et la *base* l'électricité *négative*. M. Becquerel opère ainsi · il place l'acide et la base en dissolution, dans deux vases séparés en verre, A et B (*fig.* 1071); l'un de ces vases contient, par exemple, de l'acide azotique, et l'autre, une dissolution de potasse. Il plonge dans ces liquides, des lames de platine fixées aux deux bouts du fil, *aussi en platine*, d'un multiplicateur. Si les deux liquides sont réunis par une lame de platine, l'aiguille du multiplicateur ne bouge pas ; mais si la communication est établie au moyen d'une mèche de coton ou d'amiante, humectée avec de l'eau salée ou acidulée, l'acide et la base des vases A et B montant par capillarité dans cette mèche, se joignent, et aussitôt l'aiguille indique un courant allant de l'acide à la base, par le multiplicateur. Il n'y a ici qu'un seul métal ; on ne peut donc invoquer d'effet de contact.



Fig. 1071.

Indépendamment du courant qui parcourt le fil métallique réunissant les deux lames de platine, il s'en produit un autre dans le liquide, qui va de la base à l'acide, sur lequel se porte le fluide positif, et qui est comme la continuation du courant qui parcourt le fil. Dans ce qui suit, il s'agira toujours du courant dans le fil, à moins qu'on n'avertisse du contraire.



Fig. 1072.

M. Becquerel opère encore, en adaptant à l'un des bouts du fil du multiplicateur une cuiller en platine *c* (*fig*, 1072) dans laquelle il met l'acide, et à l'autre bout, une pince, aussi en platine, dans laquelle il fixe un morceau de potasse convenablement humectée ; il plonge l'extrémité du morceau de potasse dans l'acide, en ayant soin de ne pas toucher la cuiller, et aussitôt le courant se manifeste. Ce courant est assez fort pour être observé sans multiplicateur, en le faisant passer une seule fois près de l'aiguille aimantée.

M. Mousson emploie une méthode très simple; il fixe aux extrémités du fil du multiplicateur des disques en platine, sur lesquels il applique deux ron-

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, tome XXIII, page 244 ; et tome XXII, page 177.

delles de papier trempées dans les dissolutions acide et basique ; il appuie les deux rondelles l'une sur l'autre, et le courant se manifeste.

Davy ayant objecté que, dans ces expériences, l'électricité pouvait être due à ce que l'une des lames de platine était en contact avec l'acide, tandis que l'autre l'était avec la base ; M. Becquerel plongea les deux lames dans de l'acide nitrique placé en A et A' (*fig.* 1073), et réunit les deux vases par une mèche de coton mouillé, soutenue par une lame de platine, et assez longue pour que les acides ne pussent de longtemps arriver au milieu. Ayant ensuite déposé une goutte d'acide en *a*, et une goutte d'une dissolution de potasse en *c*, il y eut combinaison entre ces deux liquides, et le courant se produisit. — M. Nobili emploie 4 vases : il fait plonger les lames de platine dans deux vases contenant une dissolution de salpêtre, et communiquant, par des mèches d'amiante ou par des tubes en siphon pleins d'eau, avec ceux qui contiennent l'acide et la base, lesquels sont toujours réunis entre eux par une mèche en amiante à travers laquelle la combinaison s'effectue ; mais le courant est assez faible, à cause de l'imparfaite conductibilité de la dissolution de salpêtre.



Fig. 1073.

2° **Eau avec les acides ou les bases.** — Au moyen de la disposition de la *fig.* 1072, on peut faire agir l'eau sur un acide ou sur une base ; l'eau est placée dans la cuiller, et la base fixée à la pince. Si cette base est en dissolution, on y trempe une lame de platine, ou un morceau d'éponge de platine, fixée à la pince, et que l'on plonge ensuite dans la cuiller. On peut aussi employer la disposition de la *fig.* 1071. Le sens du courant montre que l'eau prend le fluide *négatif* en se combinant avec les *acides*, et le fluide positif, avec les *bases*. Elle se comporte donc comme un acide, en présence des bases, et comme une base en présence des acides ; ce qui est d'accord avec la manière de voir des chimistes. Le même accord se manifeste dans la combinaison des bases avec les alcalis, c'est-à-dire que la base se comporte comme un acide vis-à-vis de l'alcali. — Quand les sels neutres en dissolution concentrée s'unissent à l'eau, ce liquide se comporte comme base, c'est-à-dire qu'il prend le fluide *négatif*. Il résulte de ces faits, que l'eau de la mèche avec laquelle on réunit les dissolutions renfermées dans des vases différents, produit des courants en se combinant avec ces dissolutions, mais ces courants sont généralement plus faibles que ceux que l'on veut observer.

3° **Acides entre eux.** — M. Becquerel a reconnu que, lorsque deux acides réagissent l'un sur l'autre, celui qui est le plus oxydant, c'est-à-dire qui cède le plus facilement son oxygène, prend l'électricité négative. Par exemple, si l'on met dans un tube en U, d'un côté de l'acide sulfurique et de l'autre de l'acide azotique, et qu'on plonge les bouts du fil de platine du multiplicateur dans les deux branches, le courant va de l'acide sulfurique à l'acide azotique

par le multiplicateur. Quand les acides sont engagés dans des composés salins, ils semblent conserver les mêmes tendances ; ainsi, les sulfates prennent le fluide positif en se combinant avec les azotates, les phosphates avec les sulfates, etc. M. de La Rive a formé la liste suivante, dans laquelle chaque substance prend l'électricité positive avec celle qui la suit, et l'électricité négative avec celle qui la précède :

Acide phosphorique, a. sulfurique, a. azotique, a. chlorhydrique, a. acétique, a. azoteux, dissolutions salines, dissolutions alcalines.

Il se présente quelques exceptions : certaines dissolutions salines prennent le fluide positif avec certains acides, et le fluide négatif avec certaines bases ; ce qui tient probablement à l'intervention de l'eau dans le phénomène, et à son affinité prépondérante pour l'une ou l'autre des substances en présence.

1447. Polarisation des lames de platine. — Le courant produit par l'action chimique, détermine sur les lames de platine plongées dans les liquides, un dépôt de substances gazeuses ou autres, provenant de l'action produite sur les liquides par le courant qui les traverse. M. de La Rive exprime cet effet en disant que ces lames sont *polarisées*. Les dépôts formés produisent des actions chimiques qui peuvent donner lieu à un courant inverse de celui qu'on veut observer, et qui se nomme *courant secondaire*. Par exemple, si après avoir décomposé l'eau dans un voltamètre (1438), on sépare cet appareil de la pile, et qu'on réunisse par le fil d'un multiplicateur, les deux fils de platine qui plongent dans l'eau, on observe un courant dans lequel le fil de platine qui apportait le fluide *positif* de la pile reçoit le fluide *négatif*, et réciproquement. Ce courant va en diminuant peu à peu, et finit par disparaître. Le courant secondaire peut détruire en tout ou en partie celui que l'on veut observer, surtout s'il est faible. Pour éviter cet inconvénient, M. Becquerel a imaginé de changer les lames de place à des intervalles très rapprochés, en faisant en sorte que celle qui arrive à l'endroit où elle doit recevoir une certaine espèce d'électricité, communique toujours avec le bout du fil du multiplicateur qui doit recevoir cette électricité. M. Becquerel a même imaginé pour cet objet deux appareils particuliers, qu'il nomme *dépolarisateurs*, et dans lesquels un mouvement de rotation détermine le changement mutuel de position des lames, assez rapidement pour que l'aiguille aimantée conserve sa déviation sans éprouver d'oscillations sensibles [1].

Au moyen de ces appareils, on peut constater la production de l'électricité dans une foule d'actions chimiques très faibles. M. Becquerel cite un cas curieux, où l'action de l'eau sur deux dissolutions donne un résultat inverse de celui qu'elles donneraient si elles étaient seules juxta-posées : on dispose les unes à la suite des autres une suite de mèches *oa*, *ab*, *bc*, *cd* (*fig.* 1074), entre deux vases remplis d'eau distillée et accompagnés de l'appareil dépolarisateur. Les mèches *oa* et *cd* sont imbibées d'eau, *ab* d'une dissolution de sous-

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XLII, p. 389.

carbonate de soude, et *bc* de bi-carbonate de soude. On trouve un courant dirigé dans les mèches, suivant la flèche supérieure; tandis que la réunion des deux sels donnerait un courant en sens opposé. C'est qu'il y a ici trois courants, le premier produit par l'action de l'eau de *oa* sur le sous-carbonate de *ab*; le second par l'action des deux sels; et le troisième par l'action du bi-carbonate sur l'eau de *cd*. Ces courants sont dirigés dans le sens des petites flèches, et le résultat montre que le courant en *a* est plus intense que la somme des deux autres. En général, quand plusieurs dissolutions acides neutres ou alcalines sont à la suite les unes des autres, le courant produit est le résultat de la composition des courants individuels qui ont lieu à chaque contact.



Fig. 1074.

1448. Électricité des décompositions chimiques — M. Pouillet a reconnu l'électricité dégagée par les décompositions chimiques dans lesquelles un des éléments se dégage, par la méthode suivante [1]. Un creuset incandescent en platine épais, est fixé à l'extrémité d'une tige de laiton soudée au plateau inférieur d'un électromètre condensateur, dont le plateau supérieur communique avec le sol. Si l'on projette dans ce creuset une dissolution de strontiane, chaux, baryte, soude, ou potasse, substances qui ont une grande affinité pour l'eau, le liquide prend la forme globulaire, l'eau se sépare sous forme de vapeur, de la substance dissoute, et le plateau qui communique avec le creuset se trouve chargé de fluide positif, tandis que la vapeur emporte du fluide négatif. Au moment où le liquide, par suite du refroidissement du creuset, se réduit subitement en vapeur en en touchant les parois, la quantité d'électricité est telle que les feuilles d'or divergent sans condensateur. Peltier a même constaté que l'électricité ne se dégage réellement qu'à ce moment-là, lorsque la vapeur s'échappe vivement, de manière à soustraire les fluides séparés à une recomposition immédiate [2]. On peut facilement recueillir l'électricité emportée par la vapeur, en mettant le creuset en communication avec le sol, et plongeant dans la vapeur qui s'en échappe, la tige fixée au condensateur. L'électricité n'est pas produite par le changement d'état de l'eau, car les substances qui s'évaporent sans se décomposer, comme l'eau distillée, l'acide acétique pur et cristallisable, les acides sulfurique et azotique purs et concentrés, ne donnent aucune électricité. Avec les dissolutions d'acides ou de sels neutres ou non, le creuset prend le fluide *négatif* et la vapeur emporte le fluide *positif*. C'est le contraire de ce qui a lieu avec les alcalis. Le sel marin a été étudié tout particulièrement : une seule goutte d'eau salée dans un creuset rouge, suffit pour donner une quantité notable d'électricité. L'eau des mers, en s'évaporant, doit donc fournir à l'atmosphère de l'électricité positive (1407). L'eau commune,

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXXVI, p. 5.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. IV, p. 144.

qui tient toujours des matières salines en dissolution, se comporte comme l'eau de mer; seulement, elle donne beaucoup moins d'électricité. — On voit que les résultats qui précèdent sont l'inverse de ceux qu'on obtient quand les mêmes substances se combinent avec l'eau. Les acides volatils qui se dégagent de ce liquide sous forme de vapeur, emportent le fluide *positif.* L'ammoniaque, qui est plus volatile que l'eau, s'exhale de même en emportant le fluide *positif*, et laissant au creuset le fluide *négatif.*

M. Reich, M. Riess et M. Gaugain, ont cru pouvoir attribuer l'électricité dégagée par les dissolutions projetées dans un creuset rouge, au frottement des gouttelettes d'eau lancées contre les parois, au moment où le liquide quitte la forme globulaire. Mais alors les effets devraient être différents dans un creuset profond et sur une plaque de platine à peine concave. De plus, l'eau distillée et les acides purs devraient produire de l'électricité dans les mêmes circonstances, ce qui n'est pas.

M. Pouillet a encore recueilli de l'électricité dans la décomposition par la chaleur, de substances sèches, telles que des oxydes et des sels. Il les plaçait sur une lame de platine communiquant avec l'électromètre, et concentrait sur elles les rayons solaires, au moyen d'une lentille à échelons (II,731).

M. Henrici obtient de l'électricité de décomposition, dans des conditions toutes différentes de ce que nous venons de voir. Il plonge dans une dissolution, les deux bouts garnis de platine, du fil d'un réomètre; d'un côté, le platine est froid, et de l'autre, il est porté au rouge. Aussitôt on a un courant qui va du platine chaud au platine froid par le réomètre, quand la dissolution n'est pas capable d'attaquer le platine chaud; comme cela a lieu, par exemple, pour les acides sulfurique et nitrique étendus ou concentrés. Le courant provient alors de la décomposition de la dissolution, par la chaleur du métal. Quand le platine chaud est attaqué, comme lorsqu'on emploie l'acide chlorhydrique ou la potasse, le métal chaud prend le fluide négatif.

Doubles décompositions. — Dans les décompositions chimiques, les électricités se distribuent généralement d'une manière inverse à ce qui a lieu dans les combinaisons; il semble que chacun des éléments qui a abandonné une espèce d'électricité en se combinant, ait besoin de la reprendre au moment où il se sépare du composé. M. Becquerel a reconnu que, dans les doubles décompositions des sels, c'est-à-dire quand deux sels font un échange mutuel de leur acide et de leur base, il n'y a pas dégagement d'électricité. On pouvait prévoir ce résultat; les décompositions qu'éprouvent d'abord les deux sels produisant des effets électriques opposés à ceux qui résultent des combinaisons qui s'effectuent immédiatement après. Il paraît cependant qu'il peut y avoir quelquefois des traces sensibles d'électricité, qui proviennent sans doute de ce que les portions de fluides qui s'entre-détruisent à l'instant même où elles prennent naissance, ne sont pas exactement égales, pendant les décompositions et pendant les combinaisons qui leur succèdent.

1419. ACTION DES LIQUIDES SUR LES MÉTAUX. — Le dégagement de l'électricité

dans l'action exercée par les dissolutions sur les métaux, s'observe soit avec l'électromètre, soit avec le réomètre.

Expériences avec le condensateur. — Voici comment opère M. Becquerel : une capsule de platine c (*fig.* 1075) est mise en communication avec le plateau inférieur *a* d'un condensateur à feuilles d'or. Cette capsule reçoit un liquide qui ne l'attaque pas, et l'on y plonge l'extrémité d'une tige de métal *m*, de manière à ne pas toucher le platine. L'autre extrémité de la tige *m*, que l'on tient avec une pince à tige de verre, s'appuie sur le plateau supérieur *b* du condensateur. On trouve que ce plateau reçoit de l'électricité négative, et le plateau *a*, du fluide positif. Si la tige *m* est en zinc, il faut, pour éviter les objections, que le plateau *b* soit aussi en zinc. Il faut aussi que la capsule c repose sur du papier mouillé. Si, au lieu d'être en platine, la capsule est formée d'un métal attaquable par le liquide, le fluide *négatif* se porte sur elle quand elle est plus attaquée que le métal *m*, et *vice versâ*.

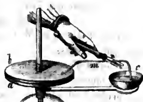


Fig. 1075.

Comme la majeure partie des électricités séparées se recombine aussitôt, si bien que l'eau acidulée ne donne pas, avec le zinc, de meilleurs résultats que l'eau commune, parce que la première conduit mieux que l'autre, on opère en projetant dans une capsule très chaude le liquide qui doit l'oxyder ; la vapeur emporte avec elle le fluide positif, et laisse au métal attaqué le fluide négatif. La quantité d'électricité recueillie par ce moyen est assez considérable pour faire diverger des feuilles d'or sans condensateur. M. Matteucci a pu, avec le potassium, obtenir des résultats semblables, sans chauffer la capsule : il écrase sur le fond d'une capsule en platine, un fragment de potassium sur lequel il laisse tomber une goutte d'eau ; l'eau est décomposée avec une vive chaleur, l'hydrogène enflammé et la vapeur emportent le fluide *positif*, et la capsule reçoit le fluide *négatif*.

M. Matteucci a aussi chargé un condensateur en n'employant qu'un seul métal [1]. Il se sert d'un condensateur en cuivre dont les plateaux sont munis de fils du même métal ; l'un de ces fils communique avec le sol, et l'autre est terminé par une lame de cuivre soutenue par un cordon en soie, et plongée dans l'eau d'un puits. Cette lame s'oxyde et transmet du fluide *négatif* au plateau avec lequel elle communique. Le résultat est plus marqué, quand on mêle un peu d'acide nitrique ou chlorhydrique à l'eau du puits.

Expériences avec le multiplicateur. — M. Œrsted plongea dans l'acide nitrique l'un des bouts *a* (*fig.* 1076) du fil de cuivre d'un multiplicateur, et quelques instants après, l'autre bout *b*. L'acide nitrique agissant plus fortement

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XVI, p. 265 et 280.

sur le cuivre au moment de son immersion, le fil plongé en dernier lieu se trouva plus attaqué que l'autre, et l'aiguille aimantée fut déviée, de manière à indiquer un courant allant, par le multiplicateur, de l'extrémité *a*, la moins attaquée, à l'extrémité *b*. Le fil attaqué *b* reçoit donc le fluide négatif, et le fluide positif chassé de sa surface dans le liquide, est reçu par le fil *a*. On voit qu'il y a aussi, à travers le liquide, un courant qui est comme la continuation de celui du multiplicateur. En réalité, il y a deux courants dans le fil métallique, puisque ses deux extrémités sont attaquées par l'acide ; mais l'un d'eux l'emporte sur l'autre, et détermine le sens de la déviation de l'aiguille. Cette expérience se faisant avec un seul métal, on ne peut invoquer d'effet de contact.


Fig. 1076.

M. Becquerel ayant réuni par le fil du multiplicateur, une lame d'or et une lame de platine plongées dans l'acide nitrique, il n'y eut aucun courant. Mais ayant ensuite ajouté un peu d'acide chlorhydrique au liquide, pour former de l'eau régale, l'or fut attaqué plus que le platine, et il y eut un courant, du platine à l'or par le multiplicateur. — Si l'on plonge dans l'acide nitrique les deux bouts du fil *en platine* d'un multiplicateur, l'aiguille aimantée ne bouge pas. Mais si l'on fait glisser une goutte d'acide chlorhydrique le long d'une des extrémités du fil, le mélange attaque le platine, et l'on a un courant qui va de l'extrémité non attaquée à celle qui a reçu l'acide chlorhydrique. Comme l'action chimique dégage de la chaleur, on pourrait attribuer le courant à l'échauffement du fil attaqué, mais le courant dû à cette cause marcherait en sens contraire de celui que l'on observe ici. Dans cette dernière expérience, comme dans celle de M. Œrsted, on n'emploie qu'un seul métal.



Fig. 1077.

Si l'on emploie deux métaux différents réunis par le fil du multiplicateur, on remarque toujours que le courant va du métal le moins attaqué à celui qui l'est le plus. Mais, dans ce cas, on ne peut éviter d'avoir au moins deux métaux en contact, et les partisans du contact comme source d'électricité, peuvent lui attribuer les résultats observés. Il faut alors reconnaître le courant par un autre moyen que le multiplicateur ; par exemple, on réunit les deux lames métalliques par des membres frais de grenouille, comme le faisait Nobili.

On peut encore reconnaître le passage du courant, par la décomposition d'un sel. M. Faraday plonge dans une dissolution, une lame de platine *p* (*fig.* 1077), et une lame de zinc *z* pliée à angle droit. Sur la partie horizontale *i* est placé un morceau de papier teint en bleu par le tournesol, et humecté avec la dissolution qui doit être décomposée, par exemple, avec de l'iodure de potassium.

Dès qu'on touche le morceau de papier avec le fil de platine *n*, le sel est décomposé en *i*. Rien n'empêche, du reste, de placer en *n* un multiplicateur à fil de platine, puisque les deux métaux sont séparés en *i*. M. Faraday a opéré de cette façon sur un grand nombre de dissolutions, et en plongeant les lames *z* et *p* dans différents liquides.

1450. Le métal le plus attaqué prend l'électricité négative. — Dans toutes les expériences qui précédent, on remarque que le métal le plus attaqué prend toujours l'électricité négative, tandis que le fluide positif, chassé dans le liquide, se porte sur l'autre métal. Cette loi est générale. Pour la faire bien ressortir, on a expérimenté avec deux lames du même métal plongées dans le même liquide, mais de manière que l'une soit plus attaquée que l'autre. On remplit cette dernière condition, soit en plongeant la première lame après l'autre, comme dans l'expérience d'Œrsted (*fig.* 1076); soit en l'agitant dans le liquide, comme l'a fait M. E. Becquerel; soit en l'échauffant, suivant la méthode de M. Faraday; soit en lui donnant une plus grande étendue qu'à l'autre; soit enfin, comme l'a fait M. de La Rive, en mettant dans les deux branches d'un tube en U le même acide à un degré différent de concentration. Par exemple, si les lames sont en zinc ou en fer, et qu'on les plonge, l'une dans l'acide sulfurique concentré, et l'autre dans l'acide faible, ce dernier attaque plus fortement le métal, et le courant marche, par le réomètre, de l'acide concentré à l'acide étendu. M. Marianini employait une lame oxydée et l'autre décapée; la dernière, plus attaquée que l'autre, recevait le fluide négatif.

III. Théorie chimique de la pile.

1451. Nous venons de voir que les actions chimiques sont une source abondante d'électricité. Or, comme les métaux de la pile sont attaqués chimiquement par le liquide qui fait communiquer les couples, on est porté à penser que l'électricité qu'ils produisent est due à cette action chimique. Fabroni, avant l'invention de la pile, attribuait déjà l'électricité qui produit les contractions de la grenouille, à l'action chimique exercée par les parties humides, sur les métaux de l'arc de communication. Pepys, puis MM. Biot et F. Cuvier, constatérent ensuite qu'une pile fonctionnant sous un récipient, absorbait l'oxygène de l'air; que dans le gaz oxygène pur, son action était plus vive, et dans l'azote, plus faible que dans l'air; ce qui montre l'influence de l'action chimique. L'électricité des actions chimiques ayant été ensuite constatée directement, on a regardé l'action du liquide de la pile sur ses éléments, comme la principale source de son électricité. Davy, après avoir voulu attribuer les effets observés par M. Becquerel, au *contact* des liquides avec les métaux, adopta une théorie mixte, dans laquelle il regardait l'action chimique comme la source principale de l'électricité de la pile; mais en attribuant toujours une influence à la force électromotrice de contact, qui déterminerait l'espèce de fluide qui se porte sur

chaque métal. Fabroni, puis Gautherot et Wollaston, ont ensuite soutenu que l'action chimique était la *seule* cause d'électricité de la pile ; mais le dernier, en voulant trop généraliser, et en attribuant à l'action chimique, même l'électricité due au frottement (1419), jeta du discrédit sur l'opinion qu'il voulait faire prévaloir. Dès 1801, époque où Volta vint répéter ses expériences à Paris, M. Parrot rejetait l'hypothèse du contact, et attribuait toute l'électricité de la pile à l'oxydation des éléments. Il développa même une théorie, dans laquelle on voit beaucoup de choses qui ont été retrouvées et confirmées depuis. Il croyait, comme Wollaston, que l'action chimique était la cause de l'électricité qui se dégage dans le frottement. En 1812, Davy montra que, dans un couple fer et cuivre, le plus oxydable des deux métaux prend l'électricité négative dans les dissolutions *oxydantes*, et que celui qui a le plus d'affinité pour le soufre prend ce fluide dans les dissolutions *sulfurantes*. Il construisit aussi une pile dans laquelle il n'y avait qu'un seul métal avec deux liquides différents. Ces faits auraient dû lui ouvrir les yeux sur le peu de fondement de l'hypothèse du contact; mais on était alors ébloui du vif éclat qu'avait jeté cette hypothèse, et frappé surtout de la merveilleuse fécondité qu'elle avait eue entre les mains de Volta.

Après la découverte du multiplicateur, MM. Avogrado et Michelotti [2] montrèrent de nouveau qu'un couple plongé successivement dans différents liquides, présente son pôle positif tantôt d'un côté, tantôt de l'autre: fait capital, et inconciliable avec les théories de Volta et de Davy. A partir de cette époque, beaucoup de physiciens travaillèrent à développer la théorie chimique de la pile; nous citerons MM. Œrsted, Becquerel, Ritchie, Pouillet, Despretz, Schœnbein, Faraday....., et principalement M. de La Rive, qui, depuis 1827, au moyen d'expériences nombreuses poursuivies avec une grande persévérance et conduites avec une rare sagacité, a concouru surtout à ruiner l'hypothèse du contact, et à faire triompher la théorie électro-chimique, que nous allons maintenant développer.

1452. Inversions produites par le changement de liquide. — Si l'on forme un couple avec du *cuivre*, et du *fer* ou de *l'étain*, le pôle négatif se trouve du côté du cuivre dans de l'eau salée ou acidulée, ou dans une dissolution de potasse. Le pôle négatif se trouve, au contraire, du côté de l'autre métal quand on plonge le couple dans l'ammoniaque; c'est que ce liquide attaque le cuivre plus activement que le fer ou l'étain, et le cuivre reçoit l'électricité négative, qui passe ensuite dans le métal en contact. Un couple *plomb* et *cuivre* ou *fer* a son pôle positif du côté du plomb dans l'acide nitrique étendu, et du côté du cuivre dans le même acide concentré. M. de La Rive a observé beaucoup d'autres phénomènes de ce genre [3].

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XLII, p. 45.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXII, p. 362.

[3] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXXVII, p. 229.

M. Faraday a publié de son côté une belle série d'expériences, dans lesquelles il a observé de nombreux cas d'*inversion* [1]. Il a constaté, de plus, qu'il n'y a d'action chimique, et par conséquent production de courant, qu'autant que le liquide est un *électrolyte*, c'est-à-dire qu'il est décomposable par l'électricité. La *fig.* 1078 représente la disposition adoptée dans ces expériences. Les deux vases reçoivent le liquide sur lequel on veut opérer. Le couple est formé par les métaux *a* et *b* réunis en *n* ; *e*, *e'* sont les électrodes en platine qui communiquent avec le réomètre. Un grand nombre d'essais, faits dans les conditions les plus variées, ont prouvé à M. Faraday qu'il n'y a jamais de courant quand il n'y a pas d'action chimique. L'absence de résultat ne pouvait être attribuée au défaut de conductibilité du liquide ; car en chauffant la soudure *n*, on obtenait un courant *thermo-électrique* qui, malgré sa faible intensité, traversait le liquide et déviait l'aiguille du réomètre. Le tableau qui suit contient une partie des résultats obtenus avec 10 métaux différents et divers liquides. Dans chaque colonne, le métal le premier inscrit est moins attaqué que ceux qui le suivent. Le premier reçoit et conduit dans le vase où il plonge le fluide négatif du métal le plus attaqué. Le pôle positif se trouve donc du côté du métal le plus attaqué, c'est-à-dire de celui qui se trouve inscrit le dernier. Chaque métal porte un numéro, qui est le même dans toutes les colonnes, et permet de reconnaître combien l'ordre est différent avec les divers liquides.



Fig. 1078.

ACIDE NITRIQUE étendu.	ACIDE NITRIQUE concentré.	ACIDE chlorhydrique.	POTASSE caustique.	SULFHYDRATE de pot. incolore.
1 Argent.	5 Nikel.	3 Antimoine.	1 Argent.	6 Fer.
2 Cuivre.	1 Argent.	1 Argent.	5 Nikel.	5 Nikel.
3 Antimoine.	3 Antimoine.	5 Nikel.	2 Cuivre.	4 Bismuth.
4 Bismuth.	2 Cuivre.	4 Bismuth.	6 Fer.	8 Plomb.
5 Nikel.	4 Bismuth.	2 Cuivre.	4 Bismuth.	1 Argent.
6 Fer.	6 Fer.	6 Fer.	8 Plomb.	3 Antimoine.
7 Étain.	7 Étain.	8 Plomb.	3 Antimoine.	7 Étain.
8 Plomb.	8 Plomb.	7 Étain.	9 Cadmium.	2 Cuivre.
9 Cadmium.	10 Zinc.	9 Cadmium.	7 Étain.	10 Zinc.
10 Zinc.	9 Cadmium,	10 Zinc.	10 Zinc.	9 Cadmium.

[1] *Archives de l'électricité*, t. I, p. 93.

Avec l'acide sulfurique étendu, la série est la même que dans la première colonne, sauf que le plomb et l'étain changent de place. Avec du sulfhydrate de potasse *jaune*, la série est toute différente de celle que donne le même sel incolore.

1453. Origine chimique de l'électricité du couple voltaïque. — L'absence de courant quand il n'y a pas d'action chimique, et les *inversions* dont nous venons de parler, prouvent bien que les électricités qui se portent de part et d'autre d'un couple, sont dues à l'action chimique exercée sur les métaux qui le composent. S'il est nécessaire de réunir deux métaux différents, c'est qu'il faut que l'action du liquide soit différente sur les deux parties du couple; sans cela, on aurait deux courants opposés qui s'entre-détruiraient. Une expérience frappante, due à Peltier, prouve bien que ce n'est pas au point de contact que l'électricité prend naissance : un couple zinc-cuivre *zc* (*fig.* 1079) est plongé dans deux vases isolés V, U contenant le même liquide. Le vase V communiquant avec le sol par un conducteur en platine *p*, on fait communiquer, au moyen d'un fil de platine isolé *r*, le point *z* avec le condensateur de l'électromètre. Cet instrument se charge aussitôt, comme si la communication était établie avec le cuivre *c*, ou avec le liquide du vase U. — Nous avons vu, du reste, qu'on peut obtenir des courants avec un seul métal, en employant deux liquides agissant d'une manière différente sur deux parties distinctes de ce métal (1450); et même sans employer de métaux, au moyen de mèches imbibées de certaines dissolutions (1446). Dans les piles dites *sèches*, l'action chimique est due à l'humidité des disques de papier; quand cette humidité a été toute consommée, et l'oxygène qu'elle contient absorbé, la pile sèche ne donne plus d'électricité.

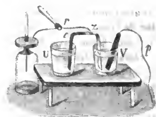


Fig. 1079.

Couple électrochimique. — On voit, d'après ce qui précède, que le couple électrochimique est réellement formé d'un zinc et d'un cuivre séparés par du liquide, et non d'un zinc et d'un cuivre juxtaposés, comme dans la théorie de Volta; le cuivre en contact avec un zinc ne faisant que transmettre l'électricité négative que chasse sur ce dernier l'action chimique exercée à sa surface.

Puisque l'action chimique est la source de l'électricité dégagée par un couple métallique, on voit qu'on doit chercher à associer deux métaux dont l'un soit attaqué fortement par le liquide, et l'autre le moins possible; l'intensité du courant, mesurée par la déviation de l'aiguille aimantée, sera d'autant plus grande que la différence d'action chimique sera elle-même plus prononcée : c'est, en effet, ce qui a lieu généralement, comme l'a constaté M. de La Rive. Le zinc convient parfaitement pour métal attaqué, quand on emploie l'eau mêlée d'acide sulfurique, l'action chimique est très vive, et le sulfate formé,

très soluble dans l'eau, ne reste pas à la surface, qui se trouve ainsi toujours librement exposée à l'action de l'acide. Le fer ne donne pas d'aussi bons résultats; en effet, il formerait le pôle négatif d'un couple de fer et zinc. Pour le métal le moins attaqué, on emploie le plus souvent le cuivre, auquel on a substitué le platine, que l'eau acidulée n'attaque pas du tout. Mais ce métal, à cause de son prix élevé, est rarement employé. La quantité absolue d'électricité dégagée dépend aussi de l'étendue des surfaces attaquées, et augmente avec elle; de sorte qu'un couple à grande surface dévie plus l'aiguille aimantée qu'un couple de petites dimensions.

Mais si la quantité d'électricité que dégage un couple dépend de son étendue et de l'activité de l'action chimique, la *tension* à ses pôles quand le circuit est ouvert, ou son *intensité*, comme l'appelle M. Faraday, dépend aussi de la nature de l'action chimique; car il ne faut pas oublier qu'une portion des fluides dégagés peut se recombiner immédiatement, et cette portion dépend, en même temps que de la conductibilité du liquide, de la manière dont les molécules se déplacent pendant l'action chimique. Par exemple, dans l'action de l'acide sulfurique sur le zinc, il y a décomposition de l'eau, combinaison de l'oxygène avec le zinc, puis combinaison de l'oxyde de zinc formé, avec l'acide sulfurique. On conçoit que, dans ces différentes réactions, les électricités dégagées successivement et en divers sens donnent un effet résultant, dépendant de la manière dont elles se succèdent, et que la portion qui échappe à la recomposition immédiate dépende en partie de la route que suivent les molécules électrisées, dans les mouvements dont les anime l'action chimique.

D'un autre côté, les fluides qui se portent de part et d'autre d'un couple, ou à ses pôles, tendent à se recombiner à travers le couple même, et cette tendance est d'autant plus prononcée que les électricités présentent une plus grande tension; cette tension augmentera d'abord, puis restera constante quand la quantité de fluide produite par l'action chimique sera égale à celle qui se recombine à travers la pile. On voit donc que la tension sera d'autant plus grande que l'action chimique fournira dans le même temps de plus grandes quantités d'électricités, et que les fluides accumulés aux pôles éprouveront plus de difficulté à traverser le liquide et les métaux qui composent le couple. Il y a, en effet, une certaine difficulté qui forme ce qu'on appelle la *résistance* du couple, et dont l'imparfaite conductibilité du liquide est une des causes. M. Pouillet a trouvé, par exemple, comme nous le verrons plus tard, qu'une dissolution de sulfate de cuivre conduit 2 500 000 fois moins que le platine, à égale section, et le platine est le moins bon conducteur des métaux.[1]

Si l'on réunit les pôles par des conducteurs, une partie des électricités accumulées passera par ces conducteurs, en formant le courant, et en quantité d'autant plus grande qu'ils offriront moins de résistance. Si ces conducteurs renfermaient des fils très fins, des interruptions que l'électricité dût franchir,

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LXII, p. 165.

des liquides peu conducteurs, si enfin le circuit présentait une très grande longueur, la proportion des fluides qui le traverseraient serait moindre, comme on pourrait le reconnaître avec une aiguille aimantée, qui serait moins déviée; alors une plus grande proportion se recombinerait à travers le couple même. Il faut donc augmenter la résistance à cette recomposition, et c'est ce que l'on fait en réunissant plusieurs couples.

1154. Théorie de la pile à plusieurs couples. — Quand on réunit plusieurs couples, la résistance intérieure qui s'oppose à la réunion des fluides accumulés aux pôles est augmentée, et l'électricité acquiert une plus forte tension.

Considérons, par exemple, trois couples égaux de zinc et cuivre *cz*, *c'z'*, *c''z''* (*fig.* 1080), séparés par de l'eau acidulée qui n'attaque que le zinc, et qui agit d'une manière identique sur tous les couples, en y développant les mêmes quantités d'électricité. L'action chimique exercée sur le zinc *z* produira les deux électricités. Une partie se recombinera à la surface même, mais il restera du fluide *positif* qui se répandra dans le liquide *zc'*, et du fluide *négatif* qui se portera sur le zinc *z*, et passera de là dans le cuivre *c*, puis dans l'eau acidulée où plonge l'électrode *e*. De même, il y a de l'électricité dégagée à la surface du zinc *z'*. Le fluide *positif* se répand dans le liquide *z'c''*, et le fluide *négatif* sur *z'c'*, et de là dans le liquide *c'z*, où il neutralise le fluide *positif* provenant du couple *cz*. Le fluide *positif* qui vient en *z'c''* est, de même, neutralisé par le fluide *négatif* provenant de l'action chimique exercée sur *z''*, et le fluide *positif* provenant de cette dernière action se rend enfin sur l'électrode *f*, qui forme le pôle positif de la pile.

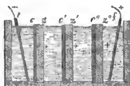


Fig. 1080.

Il y a donc à chaque extrémité de la pile, un excès d'électricité libre qui augmente très rapidement par la continuité de l'action chimique, mais qui atteint bientôt un maximum de tension, même si l'on suppose les électrodes séparés. En effet, les électricités des pôles se rejoignent à travers la pile même, et avec d'autant plus d'énergie que leur tension est plus grande. Il arrivera donc un moment où cette tension sera telle que la quantité ainsi détruite sera égale à chaque instant à celle que fournit l'action chimique. Le maximum de tension sera donc d'autant plus élevé que l'action chimique sera plus active, et que les fluides éprouveront plus de résistance à traverser la pile. Or, cette résistance s'accroît avec le nombre des couples, à cause de l'augmentation d'espace à parcourir. M. Pouillet a reconnu, en effet, par une méthode que nous ferons connaître plus tard, que la résistance de la pile augmente avec le nombre des couples.

Quand la conductibilité du liquide est faible, la tension aux pôles tend à augmenter. C'est ce qui a lieu dans les piles sèches; mais, d'un autre côté, le peu d'énergie de l'action chimique de ces sortes de piles, fait qu'elles ne se

rechargent que lentement quand on les a déchargées. Une pile zinc et cuivre montée avec de l'eau pure, est dans le même cas; quoique l'action chimique soit faible, elle finit par présenter à ses pôles des tensions sensiblement égales à celles qu'elle donnerait si elle était garnie avec de l'eau acidulée; seulement il faut plus ou moins de temps pour atteindre le maximum de tension, tandis qu'avec l'eau acidulée, on l'obtient immédiatement. M. de La Rive a fait des expériences à ce sujet, avec une pile de 600 couples. Il a reconnu que le temps nécessaire pour arriver au maximum de tension est d'autant plus court que l'action chimique est plus vive; et que, à égalité de résistance totale de la pile, il faut d'autant moins de couples pour obtenir une tension donnée, que l'action chimique est plus vive. M. Gassiot est arrivé aux mêmes résultats, au moyen d'une pile cuivre et zinc de 3520 couples plongés dans de l'eau pure, dans des vases séparés bien isolés. La tension était assez forte, malgré la lenteur de l'action chimique, pour qu'il pût obtenir une série continue de fortes étincelles.

Si nous supposons maintenant que le liquide ait une action sur le cuivre, mais plus faible que sur le zinc, l'effet général sera dû à la différence d'action chimique sur les deux métaux. Si les couples sont inégaux ou inégalement attaqués, le résultat sera au moins celui qui correspondrait au cas où tous les couples seraient égaux au plus petit, ou à celui qui serait le moins attaqué. Toute l'électricité qui s'échappe de part et d'autre du couple le plus fort ne sera pas neutralisée par les fluides des couples voisins; l'excédant se recombinera à travers ce couple même, dont l'effet se trouvera ainsi ramené à celui du couple le plus faible.

Il résulte de la théorie qui précède, qu'un seul couple doit donner la même quantité d'électricité (qu'il ne faut pas confondre avec la tension) que plusieurs couples égaux, quand les pôles sont réunis par un conducteur qui n'offre pas de résistance sensible; car les pôles ne reçoivent que les électricités des couples extrêmes. C'est, en effet, ce qui a lieu. M. Pouillet a reconnu que le courant de plusieurs couples égaux ne dévie pas plus l'aiguille aimantée que celui que produit l'un d'eux isolément. Si le courant traverse un électrolyte, on reconnaît aussi que la quantité décomposée reste la même, quel que soit le nombre de couples, pour un même poids de zinc dissous dans chacun d'eux. La réunion de plusieurs couples a donc seulement pour effet, en augmentant la résistance de la pile, de rendre plus grande la proportion des électricités qui traversent la partie extérieure du circuit. Quand cette partie offre très peu de résistance, il faut donc se contenter d'un petit nombre de couples. Nous devons remarquer cependant que deux ou trois couples peuvent donner plus d'électricité qu'un seul, parce que les électricités qui sont en présence dans l'eau acidulée s'attirant entre elles, elles s'éloignent plus rapidement des surfaces attaquées; ce qui en préserve une plus grande proportion de la recomposition immédiate. Nous verrons aussi un peu plus loin (1457), une hypothèse ingénieuse d'où il résulte que le voisinage de plusieurs couples exalte l'action chimique dans chacun d'eux.

1455. Courants de la pile. — La réunion des électricités à travers la pile forme un véritable courant allant du pôle positif au pôle négatif. Mais, indépendamment de ce courant, il y en a un autre beaucoup plus intense provenant de la réunion des électricités des couples voisins, à travers le liquide interposé. Ce dernier courant marche du pôle négatif au pôle positif (*fig.* 1080) et forme la continuation de celui qui traverse le fil conjonctif. Il est assez intense, malgré le contre-courant des pôles, pour dévier une aiguille aimantée placée sur une pile à auge, quand les électrodes sont réunis, comme l'a constaté Ampère. M. de La Rive a reconnu que ce courant a la même intensité entre tous les couples, même quand ils sont inégaux et inégalement attaqués, comme cela résulte, du reste, de ce que nous avons vu plus haut (1454). Quand le circuit est ouvert, le contre-courant des pôles est produit par des quantités d'électricité égales à celles qui se réunissent entre les couples, et l'aiguille aimantée revient à sa position d'équilibre.

1456. Des piles qui ne fonctionnent qu'avec le circuit fermé. — Il y a certaines piles qui présentent un phénomène singulier; c'est qu'elles ne donnent pas d'électricité, et qu'il ne s'y produit aucune action chimique tant que les pôles ne sont pas réunis par un conducteur. Telles sont, par exemple, les piles formées de zinc, platine et eau pure; de zinc, platine et dissolution de sulfate de zinc; de peroxyde de plomb, platine et eau..... Ce phénomène est en opposition avec la théorie du contact, car on ne trouve pas d'électricité aux pôles tant que le circuit reste ouvert. M. Schœbein [1] est parvenu à l'expliquer, dans la théorie électrochimique, au moyen de la polarisation moléculaire, si bien établie par un grand nombre d'expériences (1353).

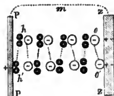


Fig. 1081.

Considérons une lame de zinc (*fig.* 1081) plongée dans de l'eau pure. Il y a une attraction chimique entre les molécules du zinc et celles de l'oxygène de l'eau, molécules qui tendent à se combiner. Cette attraction, qui n'est pas suivie d'effet, parce qu'elle ne peut vaincre l'affinité de l'oxygène pour l'hydrogène de l'eau, entraîne en même temps la rupture de l'équilibre électrique des molécules de l'eau et du zinc. Le zinc, qui est électro-positif comme tous les métaux, repousse l'hydrogène, qui est aussi électro-positif (1438), et attire l'oxygène, qui est électro-négatif. Les molécules d'eau se trouvent *polarisées* (1353), de manière que l'oxygène est, dans toutes, tourné du côté de la lame de zinc, comme on le voit dans la série *ho*. De même, les molécules de zinc se trouvent polarisées de manière que l'électricité positive se trouve du côté de la surface en contact avec l'eau, et l'électricité négative du côté opposé. Si nous plaçons en PP une lame inactive, par exemple en platine, ses molécules seront

[1] *Bibliothèque universelle de Genève* (Arch. des sc.), 1850, t. [illegible], p. 192.

polarisées par celles de l'eau, et réagiront ensuite pour augmenter la polarisation de ce liquide ; et si nous supposons les lames isolées, l'équilibre électrique que nous venons de décrire subsistera indéfiniment. Mais si l'on vient à réunir les deux lames par un fil métallique *m*, ou à les faire communiquer avec le sol, l'électricité négative du zinc s'échappera par le fil conjonctif; son électricité positive étant alors libre, agira plus vivement sur les électricités des éléments des molécules d'eau en présence, et les séparera ; l'oxygène viendra se combiner avec une molécule de zinc en neutralisant son fluide positif, et les deux atomes d'hydrogène s'uniront à l'atome d'oxygène de la molécule d'eau suivante ; l'hydrogène repoussé de celle-ci s'unira à l'oxygène de la troisième molécule, et ainsi de suite, comme on le voit dans la série *o'h'* ; et enfin, deux molécules d'hydrogène seront mises en liberté sur la surface de la lame inactive, et neutraliseront son électricité négative, pendant que l'électricité positive passera dans le fil conjonctif. Ces décharges successives se font simultanément entre toutes les molécules, comme les étincelles des tubes étincelants (1286). L'action chimique sera donc provoquée par la réunion des lames, et un courant en sera la conséquence.

Si la lame PP est électro-négative, comme le sont les peroxydes de manganèse ou de plomb, son action sur l'hydrogène se joindra à celle du zinc pour polariser les molécules d'eau ; si cette lame est électro-positive, l'eau sera polarisée moins fortement, et seulement par une différence d'action.

1457. Influence sur la polarisation, de la réunion de plusieurs couples. — La polarisation des molécules du liquide et des métaux a lieu aussi dans les couples qui sont attaqués par le liquide avant la fermeture du circuit ; on en conclut que l'action chimique doit être plus énergique quand le circuit est fermé. C'est, en effet, ce qui a lieu : on voit, par exemple, l'hydrogène se dégager plus abondamment à la surface du zinc de la pile de Wollaston quand on réunit les électrodes.

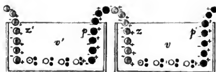


Fig. 1082.

M. de La Rive trouve dans cette polarisation des molécules, une des causes qui augmente la tension des pôles quand on réunit plusieurs couples. En effet, soit *pz* (*fig.* 1082) un couple zinc et platine ; *z'* et *p'* les lames de zinc et de platine des deux couples voisins. Si le zinc *z* n'exerçait pas d'action sur le liquide *v*, la polarisation produite en *v'* par le zinc *z'* se transmettrait simplement à *pz*, puis à *v*, qui serait polarisé comme *v'*. Mais comme *z* agit aussi pour polariser *v*, les deux actions s'ajoutent, et le liquide *v* est polarisé avec une force double. La polarisation qu'il reçoit de *z* réagit à son tour sur *z*, se transmet à *p*, puis au liquide *v'*, qui se trouve alors doublement polarisé comme *v*. Cette double polarisation active l'action chimique et augmente par

conséquent la tension aux pôles (1454). On verrait de même qu'en associant 3, 4... couples, on triple, on quadruple... la polarisation du liquide de chacun d'eux.

1458. Propriétés du zinc distillé. — La théorie de la polarisation a servi à M. de La Rive à rendre compte d'un fait très remarquable qu'il a découvert en 1830 : c'est que le zinc distillé n'est qu'à peine attaqué par l'acide sulfurique étendu d'eau, tandis qu'il l'est très vivement quand il fait partie d'un couple *dont le circuit est fermé*. M. d'Alméida a même reconnu que le zinc très pur obtenu par la décomposition d'un sel de zinc au moyen d'un courant, résiste complètement à l'action de l'acide sulfurique mêlé avec $\frac{1}{4}$ de son volume d'eau, et ne s'y dissout que très lentement quand ce liquide est bouillant. Ces phénomènes s'expliquent par la polarisation, comme nous venons de le voir. Mais comment se fait-il que le zinc impur du commerce soit attaqué vivement sans faire partie d'un circuit fermé? MM. Faraday, Grove, de La Rive, attribuent ce résultat aux parcelles de fer et de cadmium que contient le zinc du commerce [1]. Par exemple, des parcelles de fer *f, f, f* (*fig.* 1083) constitueront les éléments inactifs, ou moins actifs, d'une infinité de petits couples, dont le circuit sera fermé dans la lame même. Il se formera dans le liquide une foule de séries courbes de molécules polarisées, comme on le voit en *a, b, c*... L'hydrogène se dégagera sur les parcelles de fer, le zinc s'oxydera, et les électricités reçues par le fer et le zinc se recombineront à travers la lame. M. de La Rive a reconnu que la dissolution qui agit le plus vivement est celle qui conduit le mieux l'électricité; cette dissolution a pour densité 1,259, et renferme de 30 à 50 pour cent d'acide en poids. En examinant de près la surface du zinc, on remarque des points d'où partent les bulles d'hydrogène; ces points correspondent aux parcelles de fer. Comme elles ne sont pas dissoutes par l'acide, la surface devient inégale et rugueuse au bout d'un certain temps. Pour confirmer l'explication qui précède, M. de La Rive a mêlé à du zinc distillé en fusion, du fer en poudre même très fine, et lui a communiqué ainsi la propriété d'être vivement attaqué par l'acide sulfurique. Les métaux moins oxydables que le zinc; le cuivre, le plomb, l'étain même et le cadmium, agissent comme le fer, mais à un moindre degré. Des parcelles simplement implantées dans du zinc pur, ou même un fil de platine enroulé autour de sa surface, produisent les mêmes effets. Pour comparer les résultats, M. de La Rive coulait le zinc, pur ou mélangé, en cylindres égaux qu'il introduisait successivement dans un flacon entièrement rempli de la dissolution acide. Le volume d'hydrogène dégagé dans un temps donné était déduit de la quantité dont le liquide montait dans un tube vertical gradué communiquant avec le fond du flacon.



Fig. 1083.

[1] *Ann. de ch. et de ph.*, 2e s., t. XLIII, et *Traité d'élect.*, par M. de la Rive, t. II, 609.



Quand le zinc impur fait partie d'un couple, ces *actions locales*, comme M. Faraday appelle les petits courants superficiels dont nous venons de parler, ne font que troubler la distribution de l'électricité qui doit produire le courant principal ; de sorte que celui-ci en est affaibli. Aussi, remarque-t-on que le zinc distillé, quand le circuit est fermé, donne un courant bien plus intense que le zinc du commerce. Ce dernier s'use beaucoup plus vite, et se dissout, même quand le circuit est ouvert ; le zinc pur est donc préférable sous tous les rapports.

1459. Piles à zinc amalgamé. — Au lieu de zinc distillé ; on peut, dans la construction des piles, employer du zinc ordinaire, auquel on communique les propriétés du zinc pur, en l'amalgamant à sa surface. Pour faire cette opération, on étend du mercure sur la surface, et l'on frotte au moyen d'un tampon imbibé d'eau acidulée avec de l'acide sulfurique, pour décaper le zinc. Quand la plaque est épaisse, on répète plusieurs fois l'opération, afin que le mercure pénètre profondément. Un moyen prompt et facile, imaginé en Angleterre, consiste à plonger simplement chaque zinc dans une dissolution d'azotate de bioxyde de mercure mêlé d'acide chlorhydrique ; deux ou trois immersions suffisent pour que le zinc se trouve fortement amalgamé. La surface du zinc se trouve alors recouverte d'une couche d'un amalgame homogène, dont tous les points sont également oxydables ; ce qui fait qu'elle n'est pas attaquée tant que le circuit reste ouvert, et qu'il s'en dégage beaucoup d'électricité quand le circuit est fermé.

Les propriétés du zinc amalgamé ont été signalées par Davy, en 1826 ; l'idée d'en faire usage dans la construction de la pile est due à M. Kemp ; elle constitue l'un des perfectionnements les plus remarquables qu'on ait apporté aux piles voltaïques. On peut amalgamer le zinc de celles que nous avons décrites ci-dessus (1434) ; elles offrent alors l'avantage de ne pas s'user pendant que le circuit est ouvert, et de donner, quand il est fermé, beaucoup plus d'électricité pour une même quantité de zinc dissous ; aussi, une pile de 10 couples amalgamés produit-elle des effets qui exigeraient plusieurs centaines de couples ordinaires, et même, ce à quoi on ne se serait pas attendu, ces 10 couples produisent plus d'effet que s'ils étaient formés de zinc distillé. Nous verrons plus tard comment M. J. Regnauld explique le rôle du zinc amalgamé.

IV. Des causes d'affaiblissement de la pile. — Piles à courant constant.

1460. Diminution de la force de la pile. — Une pile voltaïque dont le circuit est fermé, donne aux premiers moments beaucoup d'électricité ; ensuite, elle s'affaiblit, d'abord rapidement, puis de plus en plus lentement, de manière à ne donner, au bout de quelques heures, que de très faibles résultats. Cette diminution n'est due qu'en faible partie à l'altération du liquide par l'action

chimique, car elle subsiste quand le liquide est en assez grande quantité autour de chaque couple pour ne s'altérer que lentement ; et, de plus, la pile reprend peu à peu son énergie quand on ouvre le circuit, fait remarqué par Ritter. Figliachi et Brugnatelli disent aussi qu'il faut laisser reposer la pile pour qu'elle reprenne son activité. M. Marianini a étudié avec détail ce phénomène, au moyen d'une pile à couronne [1]; il a reconnu que la pile revient à sa force primitive quand on ouvre le circuit, d abord rapidement, puis de plus en plus lentement, comme pour l'affaiblissement. Si l'on fait passer à travers une pile affaiblie, et du pôle positif au pôle négatif, le courant d'une autre pile, la première reprend promptement sa force. On remarque aussi que l'affaiblissement est d'autant moins prononcé que, le liquide agissant moins vivement, le courant est plus faible.

M. Marianini a obtenu des résultats analogues avec des piles sèches de Zamboni. Ces sortes de piles s'affaiblissent rapidement quand les pôles sont réunis par une lame de plomb, et reprennent ensuite peu à peu leur force, quand on isole les pôles.

1461. Effet de la polarité secondaire des éléments. — M. Faraday et M. Becquerel ont reconnu que la perte de force de la pile est due principalement aux dépôts qui se forment sur les lames métalliques, par suite de la décomposition du liquide par les courants qui le traversent (1455). Nous avons déjà parlé de ces dépôts, qui constituent la *polarité secondaire* des lames (1438). Sur les plaques, comme celles de platine, vers lesquelles marche le courant *dans le liquide*, il se dépose des bases ou des substances analogues, et sur les plaques d'où part ce courant, comme celles de zinc, il se dépose des acides ou des corps analogues. Les substances déposées réagissent les unes sur les autres à travers le liquide, en dégageant de l'électricité ; le fluide positif se porte sur l'acide, et le fluide négatif sur la base. La polarité secondaire donne donc naissance à un courant inverse de celui de la pile, et qui le détruit en partie. On met en évidence cette production de courant par les couches déposées, en formant des couples avec les lames de cuivre ou de zinc d'une pile qui vient de fonctionner, et des lames neuves de même métal. On trouve que les lames qui ont servi prennent le fluide négatif, et les neuves, le fluide positif.

Dans le cas où le liquide est une dissolution saline, les dépôts sont formés d'acide et de base ou métal, et l'on peut produire un courant en associant deux lames dont l'une ait été plongée dans un acide, et l'autre dans un alcali. Mais quand le liquide est de l'eau pure ou acidulée, ce liquide est décomposé, et les dépôts sont formés de gaz hydrogène sur la lame inactive, et d'oxygène sur l'autre. M. Matteucci a prouvé directement l'existence de ces couches gazeuses sur des lames de platine qui avaient servi d'électrodes pour décomposer l'eau. Introduites dans deux petites cloches pleines d'oxygène ou d'hydrogène, la

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXXVIII, p. 337.

lame qui avait servi d'électrode négatif absorba de l'oxygène, et l'autre de l'hydrogène. Des lames neuves plongées, l'une dans ce dernier gaz, l'autre dans l'oxygène, donnent aussi un courant quand on les enfonce ensuite dans un liquide conducteur. Il suffit, du reste, qu'une seule des lames ait été plongée dans un des gaz pour qu'on obtienne un courant, et l'on remarque alors que l'hydrogène donne un résultat beaucoup plus marqué que l'oxygène. M. Schœnbein a trouvé même qu'il suffit, pour obtenir un courant, qu'une des lames neuves plonge dans de l'eau contenant de l'oxygène, et l'autre dans de l'eau distillée; les deux liquides sont séparés dans un même vase par une cloison poreuse. L'eau est hydrogénée, soit artificiellement, soit parce qu'elle a reçu de l'hydrogène dans la décomposition de l'eau, produite préalablement avec le même appareil. L'eau mêlée d'oxygène ne lui a pas donné de courant dans les mêmes circonstances.

M. Daniell a signalé, parmi les substances qui se déposent sur la lame inactive dans l'eau acidulée, du zinc métallique provenant de la décomposition du sulfate de zinc formé. Cette couche, qui peut être assez épaisse pour qu'on puisse la détacher par fragments, constitue une lame de zinc opposée à celle du couple, et fournissant un courant opposé à celui que l'on veut obtenir.

Indépendamment de l'action chimique qu'ils produisent, les dépôts, surtout quand ils sont gazeux, ralentissent encore l'action chimique en s'interposant entre les lames métalliques et le liquide, et forment un obstacle au passage de l'électricité, du liquide dans le métal, ou *vice versâ*

Il est facile de comprendre maintenant pourquoi l'affaiblissement se montre surtout quand le circuit est fermé; c'est que, alors, le courant intérieur de la pile n'étant pas contrebalancé par le contre-courant des pôles (1455), les dépôts se forment rapidement. Quand on ouvre le circuit, ces dépôts se dissolvent, et la pile reprend son énergie. Un courant d'une autre pile, dirigée en sens contraire de celui de la première, détruit la polarité en formant des dépôts de nature opposée qui neutralisent ceux qui existaient déjà.

C'est surtout sur la lame inactive, qu'il se forme des dépôts. Celui qui tend à recouvrir la lame attaquée est généralement dissous, par le fait même de l'action chimique qui s'y produit. Dans les piles à zinc et eau acidulée, le métal inactif reçoit, comme nous l'avons vu, une couche de gaz hydrogène. On rend moindre l'épaisseur de cette couche en chaque point, en donnant au cuivre une plus grande étendue qu'au zinc; ce qui nous donne aussi l'explication de l'accroissement de puissance qu'on obtient quand on replie le cuivre autour du zinc, comme dans la pile de Wollaston.

1462. De la destruction de la couche d'hydrogène au moyen de l'oxygène. — Il résulte de ce qui précède, que, pour qu'une pile chargée avec de l'eau acidulée conserve sa force, il faut enlever au fur et à mesure l'hydrogène qui se dépose sur la lame inactive. On peut parvenir à ce résultat en absorbant ce gaz au moyen de l'oxygène. C'est ce que l'on fait en ajoutant un peu d'acide azotique à l'eau acidulée : cet acide passe à l'état d'acide hypo-

azotique, en cédant de l'oxygène à l'hydrogène, qu'il absorbe en partie en formant de l'eau. L'acide azotique attaquant aussi le cuivre, le liquide prend une teinte verte.

Action de l'oxygène de l'air sur la pile. — Nous avons vu que la pile absorbe l'oxygène ambiant, et que cette absorption augmente son activité (1451). M. Adie, puis Viard[1], ont prouvé que c'est en absorbant l'hydrogène de la lame inactive que l'oxygène agit dans ce cas. Viard opérait en plongeant les métaux dans un liquide aéré ou purgé d'air par l'ébullition. La *fig.* 1084 représente l'appareil dont il a fait principalement usage. Les deux lames métalliques *l*, *l'* sont renfermées dans des tubes *t*, *t'* soutenus par un bouchon dans un même vase de verre, et fermés à leur partie inférieure par une membrane. L'un d'eux est entièrement rempli de liquide aéré, l'autre, du même liquide privé d'air par l'ébullition; ils communiquent entre eux par du liquide de même espèce dans lequel ils plongent.

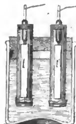


Fig. 1084.

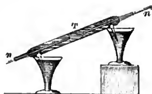


Fig. 1085.

Dans un grand nombre d'expériences, faites sur divers métaux et sur une dizaine de dissolutions différentes, Viard a reconnu que la force du courant augmente quand la lame la moins attaquée se trouve dans le liquide aéré, ce qui montre bien que l'oxygène agit principalement en absorbant l'hydrogène de cette lame. Viard a encore procédé en comparant les intensités du courant quand les deux lames plongeaient dans la même dissolution, successivement bouillie ou aérée. Parmi les différentes expériences qu'il a faites à ce sujet, nous citerons la suivante : les deux métaux *n*, *n'* (*fig.* 1085) sont engagés dans un gros tube T qu'on a rempli de dissolution bouillie, au moyen de pointes effilées que l'on a ensuite scellées à la lampe. Le courant produit ayant été observé, on casse les pointes, en plaçant le tube obliquement, de manière que la pointe la plus élevée plonge dans une dissolution aérée; le tube fonctionne comme un siphon, et le liquide qu'il renferme est remplacé par du liquide aéré. Aussitôt le courant donne une déviation au moins cent fois plus grande qu'auparavant. M. Grove avait déjà constaté qu'un couple de zinc et platine incapable de décomposer l'eau, la décomposait dès qu'on mettait la lame de platine en contact avec de l'oxygène gazeux. Viard a constaté encore, en mettant le liquide à l'abri du contact de l'air, et plaçant des cloches graduées remplies d'oxygène au-dessus des deux métaux du couple, que ce gaz est absorbé, et bien plus quand le circuit est fermé que lorsqu'il est ouvert, comme on pouvait le prévoir. Les expériences

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXVI, p. 129, et XLII, p. 5.

duraient de 20 à 25 jours avec l'eau pure, et 15 à 16 heures seulement avec des liquides plus actifs.

1163. PILES A COURANT CONSTANT A UN SEUL LIQUIDE. — Nous décrirons d'abord la pile de Smée, dans laquelle la surface de la lame inactive est modifiée de manière que le gaz hydrogène puisse s'en séparer facilement. La *fig.* 1086 représente un élément de cette pile, vu de face et de profil. *z*, *zz'* sont des lames de zinc réunies par le haut, et serrées, au moyen d'une pince à vis *a*, *a'*, contre une règle de bois *cc*. Cette règle est composée de deux parties, entre lesquelles est serrée, par son extrémité supérieure, une lame de platine *pp*, dont la largeur est à peu près triple de celle du zinc. Comme on donne, par économie, une très faible épaisseur à la lame de platine, on la soutient par un cadre en bois. Le couple plonge dans de l'eau renfermant à peu près $\frac{1}{7}$ d'acide sulfurique. Le zinc est amalgamé, pour éviter les *actions locales* (1459), et le platine est *platiné*, c'est-à-dire recouvert de poudre de platine qui empêche l'hydrogène d'adhérer, ou plutôt qui fait que la couche d'hydrogène adhérente reste toujours la même. Il résulte de là que le courant produit conserve une intensité sensiblement constante, mais moindre que celle qu'il posséderait si l'hydrogène n'adhérait pas du tout au platine.

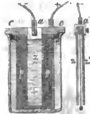


Fig. 1086. — 1/10.

Pour platiner la lame de platine, on la plonge, bien décapée, dans une dissolution de chlorure double de platine et de potassium, et on la fait communiquer avec le pôle négatif d'une pile dont le pôle positif communique avec la dissolution. Le chlorure est décomposé par le courant de la pile, et le platine se dépose sous forme de poudre noire, sur la lame de platine qui sert d'électrode négatif.

Au lieu de platine, M. Smée a employé du plaqué d'argent, comme moins coûteux ; mais il se prête mal au platinage, à cause de son poli. M. Boquillon a levé ainsi la difficulté : il dépose sur une lame de cuivre, par décomposition d'un sel, une couche de cuivre, qui rend la surface rugueuse ; et sur cette couche, une couche d'argent, qui se trouve ainsi couverte d'aspérités ; c'est sur la surface argentée ainsi obtenue qu'il précipite le platine en poudre. Enfin, M. Poggendorff ayant remplacé le platine platiné, par une lame de cuivre couverte d'une couche de cuivre pulvérulent, en a obtenu de très bons résultats.

La pile de Sturgeon (1435), dont le zinc est amalgamé, donne, quand le vase de fonte est devenu rugueux par l'oxydation, des résultats analogues à ceux de la pile de Smée, l'hydrogène n'adhérant plus à la surface du vase.

Analysons maintenant les effets électriques qui se produisent pendant les actions chimiques complexes qui ont lieu au contact du liquide et du zinc. Ce que nous allons dire pourra s'appliquer à toutes les piles à un seul liquide. Il y a ici trois actions chimiques : décomposition de l'eau, oxydation du zinc, combinaison de l'oxyde de zinc avec l'acide sulfurique. Dans la décomposition

de l'eau, l'hydrogène prend le fluide *positif*, qu'il communique au liquide, et l'oxygène le fluide *négatif;* mais en se combinant avec le zinc, ce dernier gaz prend le fluide *positif*, ce qui le ramène à l'état neutre, et le zinc prend le fluide *négatif*. Quant à la combinaison de l'acide et de l'oxyde de zinc, les électricités qu'elle dégage se neutralisent dans la combinaison des substances qui les ont reçues; de sorte que, en définitive, les électricités recueillies sont simplement celles qui correspondent à la décomposition de l'eau. Nous verrons plus tard des expériences qui confirment cette manière de voir.

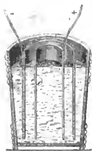


Fig. 1087.

Pile de Bagration. — Le prince de Bagration a imaginé des couples à action lente, pouvant fonctionner pendant longtemps avec une intensité d'une constance remarquable. Une lame de zinc *z* (*fig.* 1087), et une lame de cuivre *c* plongent sans se toucher dans un vase rempli de sable mouillé avec une dissolution de chlorhydrate d'ammoniaque; le courant dure jusqu'à la destruction du zinc, quand on a soin d'arroser de temps en temps le sable avec la dissolution. On peut réunir plusieurs couples, en les disposant d'une manière concentrique dans un même vase ou dans des vases séparés. Ces vases sont quelquefois des tonneaux, et l'on a alors des couples de grandes dimensions.

M. Bain, M. Loomis..... se sont aussi procuré des courants sensiblement constants, en implantant simplement des lames métalliques dans le sol humide.

Les piles que nous venons de citer ne donnent pas le maximum d'intensité. Les piles qui sont en même temps énergiques et à courant constant, contiennent deux liquides différents; c'est parmi ces piles que l'industrie choisit celles dont elle fait le plus fréquemment usage.

1464. PILES CLOISONNÉES OU A DEUX LIQUIDES. — Pour obtenir une pile à courant constant, il faut : 1° conserver au liquide qui agit sur le zinc, toujours le même degré de concentration; 2° éviter tout dépôt sur la lame inactive. Le moyen le plus sûr pour remplir cette dernière condition, consiste à plonger cette lame dans un liquide particulier qui soit capable d'absorber l'hydrogène; les deux liquides sont alors séparés par une cloison que l'électricité peut traverser, ce qui a fait donner à ces piles le nom de *piles cloisonnées*. Le premier couple à deux liquides a été imaginé, en 1829, par M. Becquerel, qui l'a nommé *chaîne simple à oxygène* [1].

Chaîne simple à oxygène. — La *fig.* 1088 représente un des couples de ce système. F est un flacon rempli d'*acide azotique*, dans lequel plonge un gros tube T, fixé par un bouchon. La partie inférieure de ce tube est fermée par un morceau de vessie, recouvert d'une couche d'argile ou de kaolin en pâte épaisse, et il est rempli d'une dissolution de potasse. Un peu de coton

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XLI, p. 19, et 3e série, t. III, p. 436.

humide, placé au-dessus de l'argile, l'empêche d'être délayée par le liquide. Des lames de platine *b* et *a*, munies de fils, plongent dans l'acide et dans la potasse. Les deux liquides se combinent à travers le tampon d'argile, et il en résulte un courant extérieur dans le sens que nous connaissons (1446). Il y a, de plus, un autre courant à travers le liquide; ce courant décompose l'eau de la potasse, et l'oxygène se dégage autour de la lame *b*. Quant à l'hydrogène, il se transporte à travers les liquides, pour se rendre sur la lame *a;* mais, arrivé dans l'acide azotique, il est absorbé par l'oxygène d'une partie de ce dernier qui passe à l'état d'acide hypo-azotique, ce qui colore le liquide en vert. Il ne se fait donc pas de dépôt gazeux en *a*. Ce même courant intérieur décompose l'azotate de potasse qui résulte de la combinaison de l'acide et de la potasse. l'acide se rend au pôle négatif en *b*, et la base au pôle positif en *a* (1438). Or, ces substances sont absorbées, l'une par la potasse, l'autre par l'acide; les lames *b* et *a* sont donc exemptes de dépôts, ce qui fait que le courant reste constant pendant plusieurs jours.



Fig 1088.

On augmente l'intensité de ce courant en remplaçant la lame *b* par une lame de zinc amalgamé, qui se combine avec l'oxygène en prenant l'électricité négative (1450), et, par conséquent, en formant un nouveau courant qui s'ajoute à celui qui résulte de la combinaison de l'acide avec la potasse. Un couple semblable est capable, à lui seul, de décomposer l'eau.

Plus tard, M. Becquerel a disposé le couple à oxygène, d'une autre manière : l'acide et la potasse sont placés dans des vases séparés A et B (*fig.* 1089), et communiquent au moyen d'un tube *aVa'* dont la partie V est en verre, et les parties *a* et *a'* en platine, portant les électrodes. De l'argile, retenue par de petits couvercles en platine criblés de trous, est placée dans les extrémités ; le reste du tube est rempli d'eau salée. Quand on fait communiquer les électrodes, on obtient un courant provenant de l'action de l'eau et du sel sur l'acide d'une part, et sur la potasse, de l'autre. La dissolution de sel finit par se remplir de cristaux d'azotate de potasse ; on la renouvelle de temps en temps, en séparant le tube V des pièces de platine *a* et *a'*.

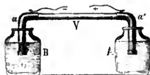


Fig. 1089.

M. Matteucci a fait beaucoup d'expériences sur des piles construites avec deux liquides différents et un seul métal. Nous aurons plus tard occasion d'en citer quelques résultats.

Pile de Daniell. — M. Daniell a imaginé, en 1836, une pile à cloison, qui donne un courant constant et énergique. Guidé par le désir d'empêcher le dépôt de zinc qu'il avait remarqué sur le cuivre de certaines piles, il eut l'idée

de séparer les deux métaux par une cloison poreuse, et de plonger le métal inactif dans une dissolution capable d'absorber l'hydrogène. La *fig.* 1090 représente le couple qu'il a d'abord construit : CC est un vase en cuivre qui sert d'élément inactif, et contient une dissolution saturée de sulfate de cuivre. Des rebords, *ab*, *cd*, servent à attacher une portion d'intestin de bœuf, qui reçoit de l'eau mêlée d'acide sulfurique, dans laquelle on plonge un morceau de zinc amalgamé *z*. Il n'y a pas d'action chimique tant que le circuit reste ouvert; mais, dès qu'il est fermé, le zinc est attaqué par l'acide, et il se forme du sulfate de zinc; l'hydrogène de l'eau décomposée arrive dans le sulfate de cuivre, s'empare de l'oxygène de l'oxyde de cuivre, et le métal se dépose sous forme pulvérulente sur la lame inactive, dont la surface reste ainsi toujours de même nature.

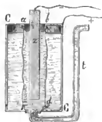


Fig. 1090.

Pour obtenir une action constante, il faut que les dissolutions ne se modifient pas. Pour cela, on fait arriver de l'eau acidulée goutte à goutte dans la case zinc, et l'excédant de liquide, contenant le sulfate de zinc que sa densité entraîne au fond, sort par le tube recourbé *t*. La dissolution de sulfate de cuivre est maintenue à l'état de saturation par des cristaux de sel qui y sont plongés.

Au lieu d'eau acidulée, on emploie souvent une dissolution de sel marin ou de sulfate de zinc, qui, restant toujours identique, n'a pas besoin d'être renouvelée. La réaction qui se produit dans ce cas a été interprétée de différentes manières. Tant que le circuit reste ouvert, il n'y a pas d'effet chimique; mais dès qu'il est fermé, le zinc est attaqué, et du cuivre se dépose sur le cylindre CC. On peut dire que l'eau des dissolutions est d'abord polarisée, comme nous l'avons expliqué (1450); dès que le circuit est fermé, l'eau est décomposée, l'oxygène s'unit au zinc, et l'hydrogène tend à se dégager sur la lame de cuivre; mais rencontrant le sulfate de cuivre, il réduit l'oxyde de cuivre en formant de l'eau, déposant le métal, et mettant l'acide sulfurique en liberté. Cet acide est transporté par le courant intérieur jusqu'à l'oxyde de zinc, avec lequel il se combine. On ne voit pas comment peut se faire ce dernier transport; mais nous aurons plus tard à signaler une foule de cas où des transports semblables ont lieu d'une manière évidente, ce qui suffit pour qu'on puisse les concevoir ici.

La forme qu'on donne au couple de Daniell est très variable. Les *fig.* 1091, 1092 et 1093 représentent trois dispositions souvent employées. C (*fig.* 1091) est un cylindre en cuivre, lesté avec du sable et fermé à sa partie supérieure par un cône qu'entoure un rebord *a* criblé de trous. Une vessie V, attachée à la partie supérieure du rebord, enveloppe le cylindre de cuivre et reçoit la dissolution saturée de sulfate de cuivre. Des fragments du même sel sont placés sur le cône, et maintiennent l'état de saturation. Un manchon en zinc *z*, ouvert aux deux bouts et fendu suivant une arête, est plongé dans une dissolution de

sulfate de zinc ou de sel marin, dans laquelle baigne la vessie. Au cuivre et au zinc, sont fixés les électrodes.

La *fig.* 1092 représente deux couples dans lesquels le zinc est à l'intérieur; des vases de cuivre *c*, *c* contiennent la dissolution do sulfate de cuivre, dans laquelle plonge un sac en toile à voile rempli de la solution de sulfate de zinc. Dans cette solution s'enfonce une plaque de zinc *z*, *z*. Chaque plaque de zinc communique avec le vase de cuivre du couple voisin, au moyen de crochets *r*, *r*... qui plongent dans des coupes en fer *v*... contenant du mercure. Les vases de cuivre *c*, *c* portent des appendices KK dans lesquels on met des fragments de sulfate de cuivre baignés par la dissolution, qui pénètre par une multitude de petits trous.

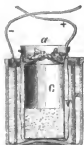


Fig. 1091.

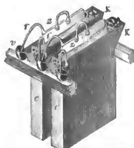


Fig. 1092.

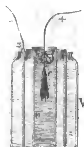


Fig. 1093.

Pile de Daniell à longue durée. — Il est souvent très important d'avoir une pile qui fonctionne pendant longtemps sans qu'on ait besoin de s'en occuper; par exemple, dans les télégraphes et les horloges électriques. On emploie souvent, alors, le couple de la *fig.* 1093. Les deux liquides sont séparés par un vase poreux *v*, renfermant la dissolution de sulfate de cuivre. Un entonnoir criblé de trous, en gutta-percha ou en porcelaine, renferme des cristaux de sel destinés à entretenir l'état de saturation. Cet entonnoir est traversé par un fil de cuivre *c*, qui plonge dans la dissolution, et forme l'électrode positif. La case zinc renferme de l'eau, à laquelle on ajoute quelques gouttes d'acide sulfurique pour commencer l'action. Cette action est faible, mais elle peut durer pendant plusieurs mois, pourvu qu'on ajoute tous les huit ou dix jours quelques morceaux de sulfate de cuivre. Le cuivre se dépose en *c* autour du fil de cuivre, en formant une masse allongée qu'on enlève au bout de quelques mois. Souvent on supprime l'entonnoir en gutta-percha, et l'on termine le fil de cuivre *c* par un disque du même métal plongé dans le liquide, et sur lequel on met les cristaux de sulfate. Le cuivre se dépose au-dessous de ce disque, d'où on l'enléve facilement; il faut éviter qu'il ne vienne toucher le vase poreux , il y adhérerait, et l'on aurait beaucoup de peine à l'en séparer.

Souvent aussi l'on renverse au-dessus du vase *v* un ballon rempli de cristaux de sulfate, retenus par un bouchon percé qui laisse pénétrer le liquide dans le col du ballon.

Pile de Wheatstone. — Dans cette pile, le zinc est réduit en amalgame ; au centre du couple (*fig.* 1094), est un vase poreux *v* rempli d'un amalgame pâteux de zinc, dans lequel plonge un gros fil de cuivre, qui reçoit l'électricité négative. Une dissolution de sulfate de zinc, dans laquelle plonge une lame de cuivre, entoure le vase poreux. Quand le circuit est fermé, l'eau se décompose, le zinc s'oxyde, l'hydrogène décompose l'oxyde de cuivre du sulfate, dont le métal se dépose, et l'acide sulfurique s'unit à l'oxyde de zinc pour former du sulfate de zinc qui vient au-dessus de l'amalgame. Il y aura donc un équivalent de cuivre revivifié, pour un équivalent de zinc dissous. Cette pile, peu énergique, marche avec une intensité sensiblement constante quand la dissolution de sulfate de cuivre reste saturée. Quand le circuit est ouvert, le zinc de l'amalgame est encore attaqué, mais très faiblement.

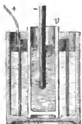


Fig. 1094.

Pile à amalgame de potassium. — Au lieu d'amalgame de zinc, M. Wheastone en emploie d'autres, par exemple l'*amalgame de potassium*. M. Goodmann dispose ainsi un couple à potassium. Le métal, dans lequel s'enfonce un fil de cuivre, est placé au fond d'un tube fermé par une membrane. Une goutte de mercure placée sur la membrane, tient amalgamée la surface du potassium, qui est recouvert d'huile de naphte pour le préserver du contact de l'air. Le tube s'enfonce dans de l'eau acidulée, ou dans une dissolution de sulfate de cuivre, recevant une lame de platine. Avec le dernier liquide, le courant est plus faible, mais plus constant.

1465. Des diaphragmes. — Dans les piles précédentes on sépare les deux liquides au moyen de différents diaphragmes de nature organique ou inorganique. Parmi les substances organiques, nous citerons d'abord les membranes de baudruche ou de vessie, qui laissent facilement passer l'électricité, mais qui s'altèrent promptement, et permettent trop facilement le mélange des liquides par endosmose. Le cuir tanné sans corps gras dure plus longtemps ; il faut avoir soin de le tenir dans l'eau quand il a été plongé dans des dissolutions salines, sans quoi il durcit et arrête l'électricité. La toile à voile, le carton goudronné sont d'un bon usage. Il en est de même des bois de sapin ou de tilleul en lames minces, débarrassés des matières résineuses par l'ébullition dans de l'eau alcaline ; mais il faut les laisser dans de l'eau légèrement acidulée, quand on ne s'en sert pas, autrement ils se déforment et se fendent en séchant.

Les diaphragmes inorganiques sont des vases perméables aux liquides en argile demi-cuite, en terre de pipe, en porcelaine dégourdie. Ces diaphragmes, que nous devons à M. Grove, durent indéfiniment quand on a soin de les

plonger dans l'eau après qu'ils ont servi, pour éviter que les sels, en cristallisant dans leurs pores, ne les fassent fendre. Mais ils résistent notablement au passage de l'électricité, surtout ceux en porcelaine; aussi s'applique-t-on à leur donner le moins d'épaisseur possible. Malgré ce défaut, on les préfère, dans les applications industrielles de la pile, aux diaphragmes organiques : souvent les diaphragmes en terre poreuse s'incrustent de cuivre, et alors, comme l'a constaté M. du Moncel, la résistance au passage de l'électricité est diminuée, et la pile devient plus énergique, pourvu toutefois que les incrustations n'altèrent pas trop la perméabilité.

1466. Piles à acide azotique autour de l'élément inactif. — Ces piles donnent un courant constant très énergique ; les premières ont été imaginées par M. Grove.


Fig. 1095.

Pile de Grove. — Une lame recourbée, en zinc amalgamé *zz* (*fig.* 1095), est plongée dans un vase V, et enveloppe de deux côtés un vase poreux *vv*, dans lequel s'enfonce une lame de platine *p*. Le vase poreux est rempli d'acide nitrique, et le zinc plonge dans de l'eau acidulée par l'acide sulfurique. Quand le circuit est fermé, le zinc est attaqué en donnant naissance à du gaz hydrogène ; ce gaz est absorbé par de l'acide nitrique, qui passe à l'état d'acide hypo-azotique. La bonne conductibilité des liquides rend cette pile très énergique ; mais quand elle fonctionne pendant quelque temps, l'acide azotique s'échauffe et répand des vapeurs d'acide hypo-azotique qui sont très incommodes. On atténue cet inconvénient en mêlant un peu d'acide sulfurique à l'acide azotique, et le courant reste alors constant pendant plus longtemps. D'un autre côté, le platine finit par devenir très cassant sous l'influence de l'électricité ; aussi M. Grove eut-il l'idée, dès 1839, de le remplacer par du charbon de bois ou de la plombagine artificielle, et l'on construisit, à Londres, des piles avec cette modification.


Fig. 1096.

Couples à tête de pipe. — Dans les premières piles construites par M. Grove, le diaphragme est formé par une tête de pipe, dont la lumière est bouchée (*fig.* 1096). L'acide sulfurique est remplacé par de l'acide chlorhydrique, dont le chlore s'unit au zinc, pendant que l'hydrogène est absorbé par l'acide azotique. Ces petits couples produisent des effets étonnants, eu égard à leurs dimensions ; ce qui tient en partie à la grande perméabilité de la terre de pipe. Avec 6 couples, on peut décomposer rapidement l'eau, et faire rougir un fil fin en platine.

Pile de Schœnbein. — M. Schœnbein ayant reconnu que le *fer passif*, c'est-à-dire rendu inattaquable à l'acide nitrique, par les moyens que nous indiquerons plus tard, peut remplacer le platine de la pile de Grove,

construisit le couple suivant[1] : un vase cylindrique en *fonte passive* forme l'élément inactif, et reçoit un mélange de 3 parties d'acide azotique et de 1 partie d'acide sulfurique du commerce. Le vase poreux est plongé dans ce liquide ; il est rempli d'eau acidulée, dans laquelle plonge un cylindre de fonte ordinaire qui forme le pôle négatif. Ce couple très énergique est peu coûteux ; de plus, le sulfate de fer qui s'y forme ayant plusieurs usages dans l'industrie, sa valeur vient en déduction des frais d'entretien de la pile.

Cette pile, comme celles de M. Grove et les piles à charbon que nous allons décrire, perd peu à peu de son intensité par l'altération des liquides, surtout de l'eau acidulée, qu'il faut renouveler de temps en temps. L'acide azotique s'affaiblit aussi par la formation de l'acide hypo-azotique, ce qui a moins d'inconvénients ; on peut, du reste, lui rendre toute sa force par un procédé fort simple, dû à M. Leroux, en y versant un peu d'acide sulfurique concentré, qui s'empare de l'excès d'eau de l'acide azotique.

1467. Piles à charbon. — Les essais de Grove pour remplacer le platine de sa pile, par du charbon, étaient passés presque inaperçus, lorsque M. Bunsen,

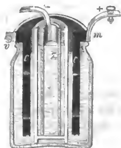


Fig. 1097.

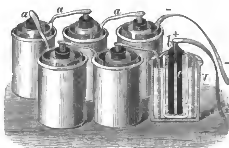


Fig. 1098.

en 1843, ayant eu aussi l'idée d'employer du charbon, pour substance inactive de la pile à acide azotique, imagina une espèce de charbon pouvant se mouler facilement [1]. Le couple qu'il construisit, et qui est désigné sous le nom de *couple de Bunsen*, consiste (*fig.* 1097) en un cylindre de zinc amalgamé *z* plongé dans l'eau acidulée contenant de $\frac{1}{7}$ à $\frac{1}{8}$ d'acide sulfurique du commerce. Ce liquide est renfermé dans le vase poreux. Un manchon en charbon *cc* enveloppe ce vase et plonge dans l'acide nitrique ; le bord supérieur de ce manchon est imbibé de cire, pour empêcher l'acide d'atteindre par capillarité, le collier

[1] *Archives de l'électricité*, t. II, p. 286.

[2] Pour préparer ce charbon, on introduit dans un moule en tôle, du coke en poudre impalpable, mélangé de la moitié de son poids de houille, et l'on chauffe au rouge, jusqu'à ce qu'il ne se dégage plus de gaz. Le charbon est alors assez compacte et assez dur pour se travailler à la lime et au tour.

en cuivre *mv* serré par une vis *v*, et portant une languette *m*, qui forme l'électrode positif.

M. Archereau a modifié le couple de Bunsen en mettant le zinc en dehors pour augmenter l'étendue de la surface attaquée, revenant ainsi à la disposition adoptée primitivement par M. Grove. Pour charbon, il emploie des prismes de cette plombagine artificielle qui se forme dans les cornues à gaz d'éclairage. La *fig.* 1098 représente 6 couples de la pile ainsi modifiée. En V est une section faite par un plan passant par l'axe d'un de ces couples; *c* est le charbon. — Pour faire communiquer les couples entre eux, M. Archereau entoure le charbon d'un collier serré par une vis, et muni d'une bande de cuivre qui va se réunir, au moyen d'une pince à vis, à une bande semblable fixée au zinc du couple suivant. M. Deleuil, qui forme le cylindre intérieur au moyen du charbon préparé de M. Bunsen, termine les bandes *a*, *a*, *a*.... fixées aux zinc (*fig.* 1098), par des troncs de cône en cuivre *b* qu'on enfonce dans des trous pratiqués dans les cylindres de charbon. M. du Moncel creuse simplement une cavité dans la base de ce cylindre, y met du mercure, et y plonge l'extrémité de la bande de cuivre fixée au zinc du couple suivant.

Les couples à charbon intérieur, désignés souvent sous le nom de *couples d'Archereau*, sont bien plus puissants que les couples à charbon extérieur. Il faut généralement deux de ces derniers pour produire les mêmes effets, et donner la même tension qu'un seul couple à charbon intérieur de même grandeur. On a adopté, en France, deux modèles principaux : l'un de 20 à 22^{cm} de hauteur, l'autre de 13 à 14. Un seul couple du grand modèle suffit pour faire rougir un fil de platine, et deux décomposent l'eau avec rapidité.

1468. Piles dont tous les couples s'amorcent en même temps. — Les piles à charbon sont très énergiques et fréquemment employées; mais elles sont longues et pénibles à monter et à démonter. On a donc cherché des dispositions permettant de mettre les couples en contact avec les liquides ou de les en séparer tous à la fois, comme cela a lieu dans la pile de Wollaston. M. du Moncel a imaginé le moyen suivant : les vases poreux, contenant l'acide azotique et le charbon, sont fixés par le haut dans des trous pratiqués dans une planche, de manière qu'on peut les enlever tous simultanément. On les plonge alors dans une série de vases cylindriques en verre, disposés à côté de la pile, et renfermant de l'acide azotique; sans cette précaution, l'acide suinterait à travers les parois des diaphragmes. Un petit trou, pratiqué dans le haut des vases poreux, permet au liquide de prendre le même niveau en dedans et en dehors de ces vases. La planche est enduite, même dans l'intérieur des trous, d'une couche de cire à bouteilles ou de gutta-percha, pour préserver le bois des émanations de l'acide. Les lames de zinc sont fixées à un cadre en bois, au moyen d'oreilles; on peut donc, après avoir enlevé les vases poreux, faire sortir simultanément toutes ces lames, de l'eau acidulée. La manœuvre inverse permet de mettre, en deux mouvements, la pile en état de fonctionner.

La communication entre les couples est établie au moyen de fils de cuivre enveloppés de gutta-percha, assez longs pour se prêter aux déplacements que nous venons d'indiquer.

Cette disposition ingénieuse ne peut s'appliquer qu'à un petit nombre de couples. Pour les piles qui en ont un grand nombre, M. Archereau emploie deux pompes, qui injectent, l'une de l'acide azotique, l'autre de l'eau acidulée. Ces liquides sont conduits par deux tubes en gutta-percha, envoyant des embranchements jusqu'au fond des vases de la pile, qui reste toujours montée, de manière à former deux systèmes de siphons qui établissent un même niveau dans tous les vases qui reçoivent le même liquide. Quand on veut vider les vases, ces tubes deviennent tubes aspirateurs des pompes, au moyen d'un artifice particulier. M. Archereau a encore employé une autre méthode, qui exige, comme celle-ci, la mise en mouvement de grandes quantités d'acide.

Nous avons imaginé une disposition dans laquelle on évite cet inconvénient, et qui peut s'appliquer aux batteries d'un grand nombre de couples. Les vases poreux et les cylindres de zinc *z* sont fixés à un même châssis, vu en dessus en *c'c'*, de profil en *cc*, et en coupe en *c''c''* (*fig.* 1099). Les couples sont réunis deux à deux au moyen des tiges de cuivre *r*, *r*.. *r'*. On peut donc enlever tous ces couples en même temps; on les transporte dans une auge unique *aa*, parallèle à la rangée de couples, et dans laquelle est disposée une série de vases cylindriques en verre V contenant de l'acide nitrique. Les vases poreux s'enfoncent dans les vases de verre, que les lames de zinc enveloppent en plongeant dans de l'eau que contient l'auge.

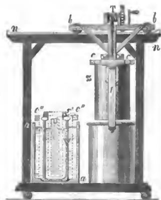




Fig. 1099.

Pour transporter ainsi les couples, quand ils sont nombreux, on emploie un système d'engrenage et de chaînes, comme dans la pile de Wollaston (*fig.* 1053), avec cette différence que la barre qui supporte le treuil T (*fig.* 1099) porte à ses deux extrémités des pièces transversales, dont l'une se voit en *bb*, pouvant rouler, au moyen de galets, sur deux barres fixes à rails *nn*. Après avoir soulevé les couples, on pousse tout le système latéralement, pour le transporter au-dessus de l'auge *aa*, dans laquelle on peut ensuite le faire descendre, la barre *t*, qui se déplace avec la traverse *bb*, sert à guider le châssis *cc* pendant son ascension et sa descente. Les vases poreux sont fermés par des couvercles qui empêchent l'acide azotique de s'évaporer, et ils

sont entourés de bourrelets annulaires en caoutchouc qui ferment les vases de verre. On conçoit qu'il serait facile de disposer ainsi, parallélement, plusieurs rangées de couples, en ayant soin d'avoir autant d'auges que de rangées.

1469. Modifications diverses des piles à charbon. — On a fait beaucoup d'essais, dans ces derniers temps, pour augmenter l'énergie des piles à charbon et les rendre d'un usage plus économique. MM. E. Liais et L. Fleury, en 1852, ont supprimé le vase poreux et versé l'acide azotique dans une cavité ménagée dans l'axe du cylindre de charbon. Celui-ci, qui doit être très poreux, laisse suinter l'acide azotique, dont sa surface est toujours imbibée. La puissance du couple est alors égale à celle d'un couple ordinaire dont le zinc aurait une étendue *cinq* fois plus grande.

Les mêmes inventeurs ont encore employé la disposition suivante : le charbon est à l'extérieur, comme dans la pile de Bunsen, et plonge dans de l'acide sulfurique concentré. Il y a un vase poreux rempli d'eau acidulée à 12°, dans laquelle plonge le zinc. Une rigole circulaire, creusée dans la partie supérieure du charbon, reçoit de l'acide azotique. Le couple donne alors une tension à peu près double de celle d'un couple ordinaire de Bunsen. En disposant plusieurs diaphragmes concentriques contenant de l'acide sulfurique de force décroissant de l'extérieur au vase intérieur, on obtient encore une tension plus forte, et un seul couple peut en remplacer plusieurs construits dans le système ordinaire.

Le haut prix de l'acide azotique et l'inconvénient des vapeurs qu'il répand, ont fait essayer d'autres substances capables d'absorber l'hydrogène. M. Leroux a employé le chlore : il entoure le charbon intérieur d'un mélange d'acide chlorhydrique et de peroxyde de manganése, qui dégage du chlore. Si l'on chauffe à 35°, le courant augmente beaucoup d'intensité. M. Guignet emploie du sulfate de peroxyde de fer, qui est facilement réduit par l'hydrogène ; ou bien encore un mélange d'acide sulfurique et de peroxyde de manganése qui fournit de l'oxigéne. M. Lavenarde a remplacé l'eau acidulée qui baigne le zinc, par une dissolution de sel marin ou d'hypochlorite de chaux, et l'acide azotique, par de l'eau acidulée par l'acide sulfurique, ou une dissolution de carbonate de potasse ou de soude. La pile est alors plus faible, mais plus constante que celle de Bunsen.

M. Buff obtient les mêmes résultats en mettant autour du charbon, du perchlorure de fer, contenant 4 ou 5 centièmes d'acide chlorhydrique.

M. Marié-Davy ayant remplacé l'eau acidulée par de l'eau pure, et l'acide azotique par une pâte de sulfate de mercure, qui absorbe l'hydrogène en mettant le mercure en liberté, a construit une pile des plus commodes ; car il n'y a qu'à remplacer l'eau qui s'évapore. Des expériences faites sur les lignes télégraphiques ont prouvé que 38 couples de cette pile remplacent avantageusement plus de 60 couples de Daniell.

1470. Piles nouvelles. — On fait aujourd'hui un emploi de plus en plus fréquent de l'électricité dans l'industrie et dans la télégraphie. Aussi a-t-on multiplié les tentatives pour obtenir une pile d'un emploi commode, et four-

nissant l'électricité à bon marché. On cherche surtout aujourd'hui à en construire dont les produits puissent être utilisés dans l'industrie, de manière à diminuer les frais d'entretien. Beaucoup de tentatives ont été faites dans divers sens ; nous allons faire connaître quelques-unes des solutions qui ont été proposées.

Piles à sulfate de plomb. — On a cherché à absorber l'hydrogène par des substances solides, de manière à n'avoir plus besoin de vases poreux. C'est ainsi que M. de La Rive a remplacé le charbon par du peroxyde de manganèse ou par du peroxyde de plomb. M. Becquerel et M. Marié-Davy ont employé le *sulfate de plomb*, qui réduit en pâte avec de l'eau salée, se moule et durcit comme le plâtre. Le sulfate de plomb agit ici comme le sulfate de cuivre de la pile de Daniell.

Pile à iodure de potassium. — M. Doat met en dehors du vase poreux de la pile de Bunsen du mercure, qui remplace le zinc, et une dissolution saturée d'*iodure de potassium*. L'acide azotique est remplacé par une dissolution d'*iode* dans l'iodure de potassium. Quand le circuit est fermé, l'iode attaque le mercure, et il se forme du proto-iodure de mercure. Mais cette substance, en contact avec l'iodure de potassium, abandonne la moitié de son mercure et passe à l'état de *periodure*, qui agit fortement sur le mercure pour se changer en proto-iodure, ce qui augmente encore la quantité d'électricité fournie. Cela continue ainsi jusqu'à ce que le liquide soit saturé de periodure de mercure dissous dans l'iodure de potassium. On retire alors le liquide avec un siphon et l'on en sépare le periodure de mercure par distillation, puis on régénère le mercure par la baryte, qui forme de l'iodure de baryum et de l'oxyde de mercure qu'on décompose par la chaleur. — Les couples de cette pile ont la forme de parallélipipèdes aplatis ; ils sont posés sur une planche qui peut s'incliner plus ou moins, de manière qu'on peut faire varier le niveau du mercure, et l'accumuler plus ou moins vers un des angles, pour modifier la quantité produite d'électricité.

Pile au bichromate de potasse. — Cette pile est à un seul liquide. Le bichromate de potasse a pour la première fois été employé dans la pile, par M. Bunsen. M. Poggendorff a trouvé que ces piles s'affaiblissent rapidement à cause du dépôt de l'oxyde de chrome sur le zinc. MM. Grenet et Fonvielle ont eu alors l'idée d'empêcher le dépôt en faisant passer des bulles d'air à travers le liquide, au moyen d'une soufflerie. Ce liquide est composé de bichromate de potasse dissous dans l'acide sulfurique concentré, et les couples sont formés de lames de zinc et de charbon. Ces piles paraissent surtout propres à faire rougir des fils métalliques, et sont employées pour cautériser, par une méthode dont nous parlerons plus tard. — M. Poggendorff emploie le bichromate de potasse à la place de l'acide azotique de la pile de Bunsen, et il paraît qu'alors l'électricité coûte 3 fois moins qu'avec l'acide azotique.

Pile de M. Palagi. — Cette pile, qui s'use à peine, se compose d'un vase profond rempli d'eau pure ou salée, dans laquelle s'enfonce une longue bande de zinc, et une chaîne formée de morceaux de charbon suspendus les uns aux

autres par des fils de cuivre. Le courant est faible, mais il dure indéfiniment, pourvu qu'on remplace l'eau qui s'évapore.

On a imaginé encore d'autres piles qui ne sont, pour la plupart, que des modifications de celles que nous venons de faire connaître; mais presque toutes attendent encore, soit la sanction d'une expérience de longue durée, soit des perfectionnements qui fassent disparaître divers inconvénients qui leur sont inhérents.

Il nous reste à décrire deux espèces de piles qui ne sont pas d'un usage pratique, mais qui sont très importantes à considérer sous le rapport théorique : ce sont les piles secondaires de Ritter, et les piles à gaz de M. Grove.

1471. Piles secondaires de Ritter. — Nous avons vu comment la polarité secondaire des éléments affaiblit les piles à un liquide. Ce même phénomène sert à rendre compte des effets des *piles secondaires*, inventées par Ritter. Ces piles sont faites comme les piles à colonne, à couronne, ou à auges, avec cette différence essentielle, que les couches liquides sont séparées par des lames formées d'un seul métal. Ce système ne produit aucun effet; mais si l'on vient à le faire traverser pendant quelque temps, dans le sens de sa longueur, par un courant électrique, il acquiert toutes les propriétés d'une pile ordinaire dont le pôle positif serait à l'extrémité par laquelle entrait le fluide. La puissance de cette *pile secondaire* diminue peu à peu, et finit par disparaître au bout d'un temps d'autant plus long que le courant l'a traversée pendant plus longtemps.

Ritter expliquait ces résultats par la pénétration de l'électricité de la pile auxiliaire, dans les parties extrêmes de la pile secondaire, qui, formant un conducteur imparfait, laissait ensuite sortir peu à peu cette électricité. Il assimilait ainsi la pile secondaire à une bande de papier mouillé, dont on mettrait les extrémités en contact avec les pôles d'une pile, et qui reste chargée des deux fluides, à ses extrémités. Mais l'expérience prouve que la pile secondaire est traversée de part en part par le courant qui sert à la charger, tandis que, dans l'explication de Ritter, les électrodes de la pile auxiliaire ne renfermeraient que de l'électricité de tension, incapable d'agir sur l'aiguille aimantée.

Volta rejeta dès le principe cette explication : il admit que le liquide, ordinairement une dissolution saline, est décomposé dans chaque compartiment, l'acide se portant sur la lame par laquelle arrive le fluide positif et la base sur celle qui amène le fluide négatif; les couches déposées forment alors, par leur contact avec les lames, des couples électromoteurs. M. Marianini a fait un long travail pour démontrer qu'il en est ainsi [1].

Les dépôts admis par Volta ne sont autre chose que ceux qui constituent la polarité secondaire des lames (1447); l'action chimique que produisent ces dépôts en réagissant ensuite les uns sur les autres, donne lieu au courant de la pile secondaire. L'électricité positive se portant sur l'acide (1446),

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXXV, p. 401.

on voit que le pôle positif de la pile secondaire sera à l'extrémité par laquelle est entré le courant qui l'a traversée.

Pile secondaire de M. Planté. — M. Planté a construit une pile secondaire qui produit des effets remarquables. Chaque couple est formé de deux longues lames de plomb, roulées en hélice, séparées par une toile grossière, et plongées dans de l'eau contenant $\frac{1}{10}$ d'acide sulfurique. Neuf de ces couples, disposés en batteries de trois, à surface triple, se chargent en quelques minutes par le passage du courant de 5 petits couples de Bunsen, de manière à donner ensuite une étincelle d'une intensité extraordinaire. Les couples, renfermés dans des bocaux bouchés, sont toujours prêts à servir, toutes les fois qu'on voudra, avec une faible pile, obtenir de fortes décharges. Ils se comportent comme des *condensateurs*, fournissant en un instant l'électricité produite

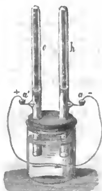


Fig. 1100.

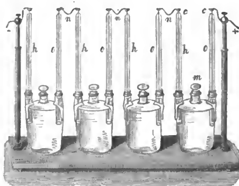


Fig. 1101.

pendant un certain temps par une pile ordinaire. La théorie de la pile secondaire, telle qu'elle a été formulée ci-dessus, ne s'applique que bien difficilement à des effets aussi prompts et aussi intenses; elle a donc besoin d'être de nouveau étudiée.

1472. Batterie voltaïque à gaz. — Les gaz oxygéne et hydrogène adhérant à des lames de platine, produisent un courant, quand on les plonge dans un liquide, et qu'on les réunit par un fil conjonctif (1461). Ce courant s'affaiblit rapidement et disparaît bientôt. M. Grove est parvenu à le rendre permanent, au moyen de ces mêmes gaz en contact avec le platine, dans un appareil trés curieux, qu'il nomme *batterie voltaïque à gaz* [1]. La *fig.* 1100 représente un couple à gaz. Deux tubes *o*, *h*, fixés verticalement à l'ouverture d'un vase, renferment des lames de platine qui communiquent au dehors par les appendices *a* et *a'*. Les tubes et le vase contiennent de l'eau acidulée par l'acide sulfu-

[1] *Arch de l'élect.*, t. III, p. 489, et *Ann. de ch. et de ph.*, 3e série, t. VIII et IX.

rique. On fait passer dans le tube *o* de l'oxygène, et dans le tube *h* de l'hydrogéne, en quantités telles que les lames de platine plongent en partie dans le liquide. On peut encore introduire ces gaz en décomposant l'eau au moyen d'une pile, en se servant de ces lames comme électrodes. Quand ensuite on réunit les deux appendices *a*, *a'* par un fil métallique, on obtient un courant qui va de l'oxygène à l'hydrogéne. En même temps on voit l'eau monter dans les tubes, de manière à indiquer une absorption d'hydrogéne double de celle de l'oxygéne.

Pour réunir plusieurs couples semblables, M. Grove s'est arrêté à la disposition de la *fig.* 1101. Les deux tubes *o* et *h* de chaque couple sont ajustés par un renflement conique en verre usé à l'émeri dans les deux tubulures latérales d'un flacon. Des lames de platine *platiné* (1463) sont suspendues dans ces tubes par un fort fil de platine scellé à la lampe à leur partie supérieure qu'il traverse. Pour garnir chaque couple, après avoir versé de l'eau acidulée dans le flacon, par la tubulure *m*, que l'on ferme ensuite, on renverse le flacon pour remplir les tubes de liquide, puis on fait passer par la tubulure *m*, le tube recourbé par lequel on fait arriver l'oxygéne ou l'hydrogéne. On met ensuite du mercure dans les coupes, *c*, et on les joint deux à deux par un fil métallique *n*, *n*, *n*, en ayant soin de réunir toujours un tube à oxygéne avec un tube à hydrogène.

Avec 30 couples, on obtient des étincelles visibles en plein jour, et des commotions assez fortes pour être désagréables. Un seul couple suffit pour décomposer l'iodure de potassium, et deux ou trois couples, pour décomposer l'eau acidulée d'un voltamétre. Un résultat trés remarquable, qui n'est qu'un cas particulier d'une loi que nous développerons dans le chapitre suivant (§ 3), c'est que les quantités d'hydrogène et d'oxygène recueillies dans le voltamétre, sont égales à celles qui disparaissent dans *chaque* couple de la pile, pendant le même temps. Il faut donc former dans chaque couple un équivalent d'eau, pour décomposer au dehors un équivalent de ce liquide.

1473. Origine de l'électricité du couple à gaz. — On explique l'électricité du couple à gaz par la polarisation des molécules. Remarquons d'abord que les gaz ne sont absorbés dans les tubes que pendant que le circuit est fermé. Or, les molécules liquides sont polarisées par la couche d'hydrogéne qui adhère à la surface du platine, de manière que l'oxygène de ces molécules se tourne du côté de l'hydrogéne. La polarisation est augmentée par l'action de la couche d'oxygène adhérente au platine dans l'autre tube. Dés que le circuit est fermé, l'action polarisante est augmentée (1456), l'eau se décompose, et l'oxygéne libre qui se dégage à la surface de la lame de platine plongée dans l'hydrogéne, forme de l'eau en absorbant de ce gaz. De même, l'hydrogéne qui se dégage dans le tube à oxygène absorbe de ce dernier gaz.

Il résulte de cette explication, que le volume d'hydrogène absorbé, doit être double de celui de l'oxygène, comme le montre l'expérience. Cependant il disparaît quelquefois un peu plus d'hydrogéne qu'il ne faudrait; ce qui tient à

l'air dissous dans le liquide, dont l'oxygène absorbe un peu d'hydrogène. En effet, M. de La Rive n'ayant laissé que peu de liquide dans le flacon, a vu l'hydrogène être absorbé en partie, quoique le circuit restât ouvert; et au bout d'une quinzaine de jours, il trouva que l'air du flacon était remplacé par de l'azote, l'oxygène ayant été dissous par le liquide au fur et à mesure que celui-ci perdait l'oxygène qu'il contenait d'abord. Ayant opéré, au contraire, dans un appareil complétement rempli de liquide privé d'air, et dans lequel il avait introduit de l'hydrogène et de l'oxygène en décomposant l'eau, il reconnut que l'hydrogène n'était plus qu'à peine absorbé.

M. Grove a déduit de là un moyen original de faire l'analyse de l'air : deux tubes. l'un rempli d'air, l'autre d'hydrogène, contiennent des lames de platine, qui communiquent par le liquide acidulé. L'oxygène de l'air est peu à peu absorbé, et quand il n'y a plus que de l'azote, on compare son volume à celui de l'air primitif. Comme le liquide peut dissoudre un peu d'air, on a un troisième tube plein de ce gaz, qui fait connaître la quantité dissoute. Par exemple, dans une expérience, le volume de l'air avait diminué de 22 divisions au bout de deux jours dans le premier tube à air, et de 1 dans le dernier. La diminution due à l'action de l'hydrogène était donc de 21 divisions; et comme l'air en occupait d'abord 100, il y avait 0,21 d'oxygène dans cet air.

L'absorption des gaz dans le couple de Grove explique le phénomène suivant : quand on cesse de décomposer l'eau dans un voltamètre, on voit les gaz disparaître peu à peu si l'on fait communiquer les fils de platine entre eux. M. Jacobi, puis M. Poggendorf, ont observé ce phénomène, même quand les fils de platine étaient entièrement recouverts de liquide; d'où l'on conclut que l'action chimique n'a pas lieu seulement à la surface de niveau du liquide dans les tubes, comme l'avait pensé M. Grove.

M. Grove a remplacé l'oxygène et l'hydrogène de ses couples par un grand nombre d'autres gaz. L'oxygène, associé aux gaz pour lesquels il a de l'affinité, comme le bioxyde d'azote, le gaz oléfiant, l'oxyde de carbone, donne un courant plus ou moins faible, en prenant le fluide positif; avec l'oxyde de carbone, il faut dix couples pour décomposer l'iodure de potassium. L'oxygène associé à l'azote ou au protoxyde d'azote, ne donne aucun résultat, comme on pouvait le prévoir. L'hydrogène avec le chlore donne un courant très énergique; avec le protoxyde et le bioxyde d'azote, le courant est plus faible; l'hydrogène reçoit toujours l'électricité négative, et au lieu des oxydes gazeux, on trouve de l'azote dans l'un des tubes. Enfin, le chlore et l'oxyde de carbone donnent un courant assez énergique allant, à l'extérieur, du chlore à l'oxyde.

M. Grove a aussi employé les vapeurs de soufre et de phosphore dans l'azote qui, comme nous l'avons vu, est par lui-même inactif [1]. Un des tubes étant rempli d'oxygène et l'autre d'azote, il introduisait dans ce dernier un morceau de phosphore ou de soufre, au moyen d'une tige de verre terminée en haut par

[1] *Bibl. de Genève* (Arch. des sc.), t. II, p. 354.

une petite coupe. Le soufre était fondu, en faisant descendre autour du tube, un anneau de fer rouge assez large pour ne pas le toucher. L'oxygène prenait toujours l'électricité positive. Si les couples sont assez nombreux pour décomposer l'eau, pour un équivalent d'oxygène dégagé dans le voltamètre, le tube à gaz perd la même quantité d'oxygène, et le soufre ou le phosphore diminuent de poids, d'une quantité égale à leur équivalent chimique.

Enfin, M. Grove a remplacé l'un des gaz par un liquide pourvant agir chimiquement sur le gaz qu'il conservait. Ainsi, ayant rempli l'un des tubes d'oxygéne, et l'autre d'une dissolution de sulfate de protoxyde de fer, ce dernier sel absorba l'oxygène en prenant l'électricité négative. L'un des tubes ayant été rempli d'hydrogène et l'autre d'acide azotique, le gaz fut absorbé par l'acide, qui prit l'électricité positive.

Action de l'hydrogène sur le chlorure d'or. — M. E. Becquerel a découvert le résultat suivant, dont il est facile de saisir l'analogie avec les faits qui précèdent. On remplit d'hydrogène une petite éprouvette plongée dans une dissolution de chlorure d'or, et dans laquelle on introduit un fil de platine, qui traverse à la fois le gaz et la dissolution. Le chlorure est décomposé, l'hydrogène absorbé peu à peu, et l'or se dépose sur le fil de platine. Cependant le gaz et le platine, pris isolément, sont incapables de décomposer le chlorure d'or. Ces effets ont encore lieu quand on évite le contact de l'air.

1474. Electricité attribuée à la capillarité. — M. Becquerel [1] a découvert un moyen de produire de l'électricité, qui a peut-être quelque rapport avec les phénomènes qui précèdent : on plonge dans de l'acide chlorhydrique contenu dans une cuiller en platine, un morceau d'éponge de platine fixé à une pince aussi en platine, communiquant avec la cuiller par le fil d'un réomètre (*fig.* 982): aussitôt on obtient un courant qui va de l'acide à l'éponge par le réomètre, c'est-à-dire en sens contraire de ce qui aurait lieu si l'éponge était attaquée par l'acide. Ce courant cesse bientôt; il est moins prononcé quand l'acide est concentré que lorsqu'il contient 4 ou 5 fois son poids d'eau. L'acide azotique donne des résultats analogues, mais moins prononcés; quand il est concentré, il donne le courant le plus sensible. Quelquefois il y a d'abord un courant inverse de celui que nous venons d'indiquer, mais il ne dure qu'un instant. Dans toutes ces expériences, il faut laver l'éponge et les surfaces de platine, avec de l'acide azotique, que l'on fait disparaître ensuite par la chaleur. Le charbon donne des résultats analogues à ceux de l'éponge de platine, mais le courant, bien plus durable, persiste quelquefois pendant 12 heures. Les gaz condensés dans les corps poreux peuvent être la cause du courant qui se manifeste quand les liquides pénètrent dans les pores; mais la chaleur qui se dégage pendant la pénétration (II, 1047) peut aussi y contribuer. Car, si l'on retire l'éponge, de l'acide azotique concentré, et qu'on la chauffe légèrement pour l'y

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXVII, p. 389.

replonger ensuite, on obtient un courant qui va de l'éponge à l'acide par le réomètre, et qui persiste tant que l'éponge est plus chaude que l'acide. Du reste, ces phénomènes sont encore très obscurs,

V. Du contact comme source d'électricité.

1475. Il est incontestable que l'électricité de la pile est due aux actions chimiques. Le contact des métaux n'intervient pas, même pour déterminer le sens du courant, comme le prouvent les inversions et comme il résulte des expériences de M. Faraday (1360). Cependant on s'est demandé si, tout en convenant que l'action chimique est la source de l'électricité de la pile, on ne doit pas admettre que le contact des métaux peut aussi dégager de l'électricité, en quantité excessivement petite il est vrai, mais qu'il faut considérer néanmoins, ne serait-ce que sous le rapport théorique. Certains physiciens, MM. Plaff, Marianini, Fechner, Zamboni, Ohm, Peclet....., ont soutenu que le contact des métaux seul suffit pour dégager de l'électricité; d'autres, abandonnant l'action du contact des corps solides, ont déplacé la question, et ont tenté de démontrer que l'électricité de la pile était due au contact des liquides et des métaux, et que l'action chimique n'était que la conséquence, et non la cause de l'électricité dégagée. Nous allons examiner successivement ces deux opinions, que M. de La Rive surtout a combattues, au moyen d'expériences multipliées, et par des arguments nombreux et concluants.

1476. Du contact des solides. — Les premières expériences directes qui semblaient prouver le dégagement de l'électricité dans le contact des métaux, sont celles de Volta. Quand on opère en tenant la double lame entre les doigts, par l'extrémité zinc, ce métal s'oxyde par l'humidité des doigts et prend le fluide négatif, qui charge le condensateur; en effet, le zinc est terni aux points touchés. Si l'on tient la double lame par le cuivre, en interposant du papier humide entre le zinc et le condensateur, le zinc s'oxyde encore, et le fluide positif passe dans le plateau.

On peut objecter que, l'oxydation étant très faible, les quantités d'électricités dégagées devraient être imperceptibles; mais nous verrons qu'il suffit d'oxyder 1 milligramme de zinc pour fournir une quantité d'électricité capable de charger 100 000 fois un condensateur de 5 décimètres carrés de surface, de manière que chaque charge donne une étincelle de 1^{cm} de longueur. On peut admettre que la quantité d'électricité nécessaire pour charger le condensateur au point seulement de faire diverger des feuilles d'or, n'est que $\frac{1}{10000}$ de la quantité qui donne l'étincelle de 1^{cm}. Il suffira donc d'oxyder $\frac{1}{10000}$ de milligramme de zinc pour obtenir 100 000 fois la charge capable de faire diverger les feuilles d'or, ou un *billionième* de milligramme, pour une seule charge !

On peut encore charger le condensateur formé d'un plateau de zinc et d'un

plateau de cuivre, en faisant communiquer ces plateaux au moyen d'un fil métallique isolé. Dans ce cas, le plateau de zinc s'oxyde sous l'influence de l'humidité de l'air, comme le prouve la rapidité avec laquelle il se ternit. Si l'on éloigne cette cause d'oxydation, le condensateur ne se charge pas. M. de La Rive ayant recouvert les plateaux d'une couche de vernis, très épaisse excepté sur les faces en présence, n'obtint aucune charge; des tiges de platine fixées aux plateaux et sortant à travers le vernis, servaient à établir la communication. Peclet a cependant obtenu de l'électricité avec des plateaux vernis; mais M. de La Rive attribue ce résultat à ce que la couche préservatrice était trop mince. Il a reconnu, en effet, que la charge est d'autant plus faible que cette couche est plus épaisse. M. Plaff et M. Fechner ont bien obtenu aussi des charges électriques, en mettant le condensateur dans le vide ou dans l'air desséché; mais on sait combien il est difficile d'enlever toute humidité d'un récipient en verre, et nous venons de voir combien il se dégage d'électricité dans l'oxydation de quantités imperceptibles de zinc.

Il se présente ici une anomalie sur laquelle il est nécessaire de s'arrêter : on observe que le plateau de zinc se charge de fluide positif, tandis que l'oxydation devrait lui donner le fluide négatif (1358). M. de La Rive explique cette contradiction, par la polarisation électrique (1364) et le jeu des électricités dissimulées[1] : le plateau de zinc polarise les molécules de la vapeur d'eau qui le touche. Dès qu'on établit la communication entre les deux plateaux, le fluide négatif repoussé du zinc, passe dans le cuivre, et le zinc se combine avec l'oxygène de l'eau décomposée, avec neutralisation de son électricité par celle de l'oxygène. Quant à l'électricité positive de l'hydrogène, comme elle ne peut s'échapper à travers l'air mauvais conducteur, elle se porte sur le zinc, où elle est aussitôt dissimulée par le fluide négatif du plateau de cuivre; le zinc se trouve donc, en définitive, chargé d'électricité positive.

Considérons maintenant le premier procédé qu'avait employé Volta en appliquant l'un sur l'autre deux disques en zinc et en cuivre, avec lesquels il chargeait l'électromètre condensateur. Après chaque contact, le disque de zinc est chargé de fluide positif, provenant de l'action de l'air humide; mais, ici, le résultat n'est pas aussi facile à expliquer. Cependant M. de La Rive le rattache au cas précédent, en remarquant que les deux disques se comportent comme un condensateur dont la lame isolante serait formée d'une très mince couche d'air. M. Fechner a, en effet, remarqué qu'un disque de zinc, remplaçant le bouton d'un électroscope, et sur lequel était appliqué un disque de cuivre, ne produisait d'abord aucune divergence des feuilles d'or; mais que cette divergence se manifestait, quand ensuite il enlevait le disque de cuivre. M. Plaff et Peclet ont aussi constaté qu'un pareil système se comporte comme un condensateur, les deux lames ne se touchant que par quelques points, et Peclet a reconnu que, si les surfaces sont parfaitement polies de manière qu'il y ait adhérence,

[1] *Traité d'électricité théorique et appliquée*, t. II, p. 776.

le système ne se charge plus. M. Fechner a cru remarquer, au contraire, que l'effet est plus prononcé quand les surfaces sont polies. Enfin, M. Grove a montré que l'électricité des disques ne peut être due à leur contact, et qu'ils se comportent comme s'ils formaient un condensateur, quand on les sépare par une bande annulaire en papier. Il a pu ainsi répéter l'expérience de Volta, et charger le condensateur; seulement il lui fallait répéter plus souvent l'opération, à cause de la plus grande épaisseur de la lame d'air interposée entre les disques.

Il nous reste enfin à parler de deux faits qu'on a tout particulièrement invoqués pour soutenir l'hypothèse du contact :

1° Peltier, a vu un condensateur dont les plateaux étaient l'un en or, l'autre en platine, réunis par un fil de platine isolé, se charger d'électricité ; le platine prenant le fluide négatif. M. de La Rive trouve l'origine de cette électricité dans l'action de l'air sur le platine. En effet, ayant recouvert ce métal d'une couche de vernis de plus en plus épaisse, il vit la charge aller en diminuant. M. E. Becquerel a confirmé l'existence de cette action de l'air, par l'expérience suivante [1] : il prit un condensateur formé de deux plateaux en platine, qui ne donnaient aucun signe d'électricité quand on les réunissait par un fil du même métal; ayant ensuite plongé l'un des plateaux dans de l'hydrogène, puis l'ayant replacé sur l'autre, l'appareil se chargea, et le plateau qui était resté dans l'air prit le fluide négatif. M. de La Rive admet que le platine condense l'oxygène à sa surface, et qu'il se combine lentement avec lui ; il remarque, pour confirmer l'existence de cette action, que l'on peut rapprocher de plusieurs propriétés du platine, entr'autres de son rôle dans la pile à gaz, que, s'il a été plongé alternativement et plusieurs fois dans l'air et dans l'hydrogène, sa surface devient rugueuse.

2° Si les plateaux du condensateur sont en zinc et en platine, et qu'on les fasse communiquer par un fil métallique, le platine prend le fluide négatif ; mais si l'on établit la communication, avec les doigts mouillés, il prend le fluide positif. Dans le premier cas, l'air agit sur le platine, qui reçoit le fluide négatif, et en même temps sur le zinc, qui prend le fluide positif, comme nous l'avons dit ci-dessus. Dans le second, le zinc oxydé par l'humidité des doigts éprouve une action chimique, qui l'emporte sur l'action exercée par l'air sur le platine, et il reste chargé d'électricité négative.

1177. Du contact des liquides et des métaux. — On voit, par ce qui précède, que toutes les fois que le contact des métaux est accompagné d'une production d'électricité, il y a toujours quelque action chimique qui rend compte de la présence de ce fluide. Si parfois il y a quelque chose d'obscur dans la manière dont se fait la distribution des fluides, ou dans la nature de l'action chimique, du moins l'existence de cette dernière peut toujours être démontrée. Les partisans du contact ont alors invoqué le contact des métaux avec les

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XXII, p. 677.

liquides ; mais, dans ce cas encore, on a pu constater l'absence de résultat toutes les fois qu'il n'y avait pas d'action chimique. De nombreuses expériences, la plupart pour soutenir l'influence du contact, ont été faites à ce sujet par MM. Becquerel, Karsten, Buff. Les plus importantes sont dues à Peclet [1] ; il chargeait l'électromètre condensateur, ou son appareil à trois plateaux (1324), au moyen de fragments de différents métaux qu'il tenait entre ses doigts, mouillés avec divers liquides. Le métal a presque toujours reçu le fluide négatif, ce qui indique une action chimique. Les métaux non oxydables, or, platine, argent, et le charbon, ont pris avec les liquides acides, le fluide positif, mais en quantité excessivement faible. M. de La Rive explique ce résultat par l'action chimique exercée par l'acide sur les doigts. Le peroxyde de manganèse a aussi pris le fluide positif, mais il se désoxyde au lieu de s'oxyder. L'huile d'olive, l'huile de naphte, donnent l'électricité négative aux métaux, comme s'ils étaient oxydés : il faut remarquer ici que la couche liquide est trop mince pour empêcher l'humidité naturelle des doigts d'arriver jusqu'au métal; autrement, comme ces liquides sont mauvais conducteurs, il n'y aurait pas communication avec le sol, et le condensateur ne se chargerait pas. Nous rappellerons encore les expériences de M. Faraday (1452) : tant que les liquides des deux vases n'attaquent pas l'un des métaux de l'arc de communication, il n'y a aucun signe d'électricité. Si l'on sépare les métaux à leur point de jonction, et qu'on interpose du papier mouillé avec un liquide capable d'attaquer un des métaux, on a aussitôt un courant.

On a dit, il est vrai, que s'il y a toujours action chimique quand il y a dégagement d'électricité dans le contact, cette action est la conséquence, et non la cause, de la présence de l'électricité. La question, ramenée à ces termes, ne peut plus être résolue par les expériences faites jusqu'à ce jour. Il nous semble cependant qu'il n'y a pas lieu à hésiter. D'abord, comment expliquer que *toujours* le contact dégagerait assez d'électricité pour décomposer les dissolutions en présence, *quelles qu'elles fussent*, quand nous voyons que les courants doivent avoir une certaine force minimum pour décomposer la plupart de ces dissolutions ? D'un autre côté, l'étude des différentes sources d'électricité prouve que, pendant que les deux fluides se produisent, les molécules des corps sont toujours dérangées de leur position d'équilibre, et que tout dégagement cesse dès que ces molécules sont revenues à l'état de repos. C'est ce qui a lieu dans le frottement, les actions chimiques, et, comme nous allons le voir, dans l'action de la chaleur. Or, dans le simple contact, les molécules en présence, une fois le contact effectué, restent en repos. Au premier moment, il peut bien y avoir un mouvement moléculaire et un changement dans l'équilibre électrique, mais il ne pourrait en résulter tout au plus qu'un dégagement momentané d'électricité, et non un dégagement *persistant* pendant toute la durée du contact. Il n'y a donc aucune raison de croire que le contact soit

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. II, p. 233.

une source d'électricité ; et même il est évident que, si à l'époque de Galvani, on eût su que les actions chimiques dégagent de l'électricité, il ne serait venu à la pensée de personne de chercher si le simple contact était plus capable do produire de l'électricité, que de produire de la chaleur ou de la lumière.

§ 3. — ELECTRICITÉ PRODUITE PAR LA CHALEUR.

I. Pyro-électricité des cristaux.

1478. — La chaleur, en dilatant les corps, détruit l'équilibre de leurs molécules. Il en résulte une séparation des deux électricités. Ces fluides tendent à se recombiner aussitôt; mais si quelque cause les porte à se rendre en des points différents du corps échauffé, ils restent séparés, et l'on peut en constater la présence. C'est ce qui a lieu dans les corps non homogènes, comme certains cristaux, ou quand la chaleur se distribue inégalement. Nous allons examiner successivement le dégagement de l'électricité dans les corps mauvais conducteurs cristallisés, et dans les bons conducteurs.

1479. Electricité de la tourmaline. — Certains cristaux ont la propriété de devenir électriques pendant que leur température varie entre certaines limites. Ce phénomène, désigné par Brewster sous le nom de *pyro-électricité*, a d'abord été constaté sur la tourmaline. Depuis un temps immémorial, les naturels de l'île de Ceylan avaient remarqué que certaines pierres vertes de formes prismatique, placées sur les cendres chaudes, en attiraient les parcelles, et ils donnèrent à ces pierres lo nom de *tournamal* (*tire-cendres*), d'où l'on a fait *tourmaline*. Les voyageurs Hollandais firent connaître ce phénomène aux Européens, vers la fin du XVII[e] siècle, et apportèrent quelques tourmalines, qui furent connues d'abord sous le nom d'*aimants de Ceylan*. Lemery, en 1717, montra à l'Académie de Paris une tourmaline qui attirait les corps légers après qu'on l'avait fait chauffer. Æpinus fit de nombreuses recherches sur deux plaques prises transversalement à l'axe du cristal, et taillées pour être montées en bague. Il put en tirer une étincelle, et constata que les faces opposées étaient toujours électrisées d'une manière contraire. Il construisit un petit appareil (*fig.* 1102) au moyen duquel il mettait ce résultat en évidence : *ac* est la tourmaline; ces deux faces sont armées de plaques métalliques communiquant avec des boutons *n n'*; un petit pendule *o*, suspendu par un fil de soie, oscille entre ces boutons, quand la tourmaline vient d'être retirée de l'eau bouillante. Dans le cours de ses recherches, Æpinus rencontra beaucoup d'anomalies, et se trouva en contradiction avec Wilson sur plusieurs points importants.

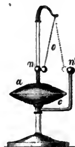


Fig. 1102.

Dans ce temps-là, les tourmalines étaient fort rares en Europe, et l'on vit la même pierre passer successivement entre les mains d'Æpinus, Canton et Priestlay. Canton fit disparaître les contradictions, en découvrant que la tourmaline n'est électrique que pendant que sa température varie ; dés que cette température est stationnaire, tout signe d'électricité disparait.

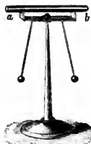


Fig. 1103.

Il y a plusieurs manières d'observer les propriétés de la tourmaline : Haüy posait le cristal préalablement chauffé, *ab* (*fig.* 1103) sur un support lesté convenablement, et muni d'une chappe en agate reposant sur une pointe. M. Becquerel le suspendait au moyen d'une chappe en papier et d'un fil de soie sans torsion, dans un cylindre de verre fermé en bas par une plaque métallique, dont il élevait la température (*fig.* 1104) ; la tourmaline s'échauffait peu à peu et devenait électrique. Quand les cristaux n'ont pas la forme de prismes allongé, MM. G. Rose et P. Riess emploient, pour les explorer, une électroscope de Bohnenberger (1437), dont ils remplacent le bouton par un petit plateau sur lequel ils posent, en ayant soin de ne pas exercer de frottement, la face du cristal, dont ils veulent connaître l'état électrique.

1480. Résultats. — 1° La tourmaline n'est électrique que pendant que sa température varie; quand cette température reste stationnaire, il n'y a aucun signe d'électricité.

2° Quand une tourmaline est échauffée régulièrement, elle prend l'électricité polaire, c'est-à-dire qu'une moitié est électrisée positivement, et l'autre négativement. On peut s'assurer avec un petit *plan d'épreuve*, que la charge diminue des extrémités au milieu, où se trouve un espace neutre.

3° Pendant le refroidissement, l'état électrique est inverse. Le renversement de pôles se fait à l'instant où la température reste stationnaire avant de décroître. Ces faits ont été constatés d'abord par Canton, puis par Bergmann.

4° La tourmaline présente ordinairement la forme d'un prisme à 6 pans, terminé à une extrémité par trois facettes obliques, et à l'autre par six. Haüy a remarqué que c'est à la première extrémité que se trouve le fluide positif pendant l'échauffement. M. Riess et les physiciens Allemands nomment *pôle homologue*, l'extrémité qui prend le fluide représenté par le même signe que la variation de température, c'est-à-dire le pôle que prend le fluide positif pendant que la température s'élève, et le fluide négatif pendant qu'elle s'abaisse. Le pôle à trois facettes est donc le pôle homologue. L'autre se nomme *pôle antilogue*; il prend l'électricité représentée par le signe opposé à celui qui indique le sens du changement de température.

5° Si une moitié seulement du prisme est échauffée ou refroidie, elle présente seule l'électricité qui lui correspond ; l'autre restant neutre.

6° Quand une des moitiés s'échauffe, pendant que l'autre se refroidit, elles

reçoivent toutes deux la même espèce d'électricité. Ce résultat, constaté par Bergmann, découle de ceux qui précèdent.

7° Il y a de grandes différences entre les tourmalines, relativement aux propriétés électriques. On en trouve qui ne peuvent s'électriser par la chaleur, d'autres qui ne s'électrisent que par un changement rapide de température. Les plus électriques sont les plus grosses et les plus transparentes, particulièrement les tourmalines vertes ou bleues du Brésil. Enfin, ces propriétés ne se manifestent qu'entre certaines limites de température, comprises généralement entre 10° et 150°. M. Gaugain a trouvé l'explication de la limite supérieure ; à 150°, la tourmaline est un très bon conducteur; si donc les électricités se séparent, elles se recombinent aussitôt.

8° Canton a découvert que, si l'on brise transversalement une tourmaline en voie de refroidissement, chaque fragment présente deux pôles opposés, comme lorsqu'on brise un aimant. Les plus petites parcelles ont la faculté de s'électriser : M. Brewster ayant pulvérisé une tourmaline, vit les parcelles adhérer à une lame de verre chaude, et se grouper en obéissant à leurs attractions mutuelles, quand il imprimait de petites secousses à la lame. La propriété électrique appartient donc aux particules des cristaux, et non à leur masse; ce qui explique pourquoi la scolézite, qui est très électrique, l'est tout autant, comme l'a remarqué M. Breswter, après que la chaleur l'a transformée en une masse opaque et friable, composée de particules indépendantes.

1181. Etat de l'électricité dans la tourmaline. — Les fragments de tourmaline conservant les propriétés du cristal entier, on peut comparer ce cristal en voie d'échauffement ou de refroidissement aux aimants, ou aux piles sèches. On peut encore rapprocher l'état électrique des tourmalines de celui des corps isolants dans lesquels on a développé l'électricité polaire en en approchant un corps électrisé (1353); seulement, ici, l'état polaire est déterminé par la chaleur. M. Becquerel compare aussi la tourmaline aux piles électriques formées de condensateurs (1318), et il attribue l'électricité polaire du cristal échauffé, à l'écartement qui a lieu entre ses couches transversales, écartement qui les électrise d'une manière différente sur les deux faces, comme cela a lieu dans le clivage. Cette explication s'applique surtout à la topaze, qui se clive perpendiculairement à son axe.

L'électricité de la tourmaline peut se répandre au dehors; on peut l'étudier avec le plan d'épreuve, et s'en servir soit pour charger un électroscope, soit pour produire un courant. M. du Bois-Reymond, qui a obtenu ce dernier résultat, enveloppait les extrémités d'une grosse tourmaline chauffée par une lampe à alcool, de feuilles de platine communiquant avec un réomètre très sensible. Le courant partait du pôle *homologue* pendant l'échauffement, et du pôle *antilogue*, pendant le refroidissement. Cependant M. Becquerel n'avait pu réussir à charger le condensateur d'un électromètre, au moyen d'une tourmaline isolée en voie de refroidissement, et il en avait conclu qu'elle ne laissait pas

échapper d'électricité au dehors. Mais l'absence de résultat tenait à ce que les électricités opposées des deux pôles du cristal se retenaient mutuellement par leur attraction. M. Gaugain ayant eu soin de faire passer dans le sol une de ces électricités, a pu facilement charger, avec l'autre, un électroscope ordinaire à feuilles d'or[1]. Pour cela, il suspendait la tourmaline par deux fils fins en platine enroulés autour de ses extrémités, et fixés à un support isolant. Le cristal ayant été échauffé, l'un de ces fils était mis en communication avec le bouton de l'électroscope, et l'autre avec le sol. Cette dernière extrémité était à l'état neutre, et il est à remarquer que l'électricité de l'autre extrémité s'étendait alors jusque dans la partie moyenne. M. Gaugain a pu mesurer avec l'électroscope, la quantité d'électricité fournie dans un temps donné ; pour cela, il comptait le nombre de fois que les feuilles d'or, en divergeant, venaient toucher les lames de décharge.

Piles de tourmalines. — Ayant réuni plusieurs tourmalines par les pôles de même nom, M. Gaugain obtint un accroissement d'effet considérable. Au moyen de 15 cristaux, il put charger un carreau fulminant de manière à obtenir des étincelles. Ayant ensuite réuni plusieurs tourmalines bout à bout par les pôles opposés, il trouva que cette pile ne donnait pas plus d'électricité que chacune de ses parties. Il semble qu'on peut conclure de là que tous les fragments d'une même tourmaline donnent les mêmes quantités d'électricité ; mais il n'en est pas ainsi, et les plus courts fragments en donnent toujours moins que les plus longs, et moins que le cristal entier.

1182. Relation entre les quantités d'électricité et les vitesses de variation de température. — M. Becquerel s'est le premier occupé de cette question : il étudiait l'état électrique d'une tourmaline, par la méthode des oscillations[2]. Le cristal *c* (*fig.* 1104) était suspendu par un fil de cocon, dans un vase cylindrique dont le fond en cuivre était chauffé par une lampe à alcool. Ce cristal pouvait osciller entre deux tiges métalliques verticales communiquant avec les pôles opposés d'une pile sèche *aa'*, et l'on observait le nombre d'oscillations accomplies en 30ˢ, aux diverses époques du refroidissement ou de l'échauffement. La température du cristal était donnée par le thermomètre *t*. Cette méthode n'a conduit à aucune loi simple.

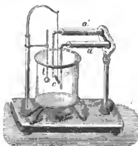


Fig. 1104.

M. Gaugain a repris la question sous une forme différente[3]. Il fait remarquer d'abord que, dans la méthode de M. Becquerel, la tourmaline étant isolée,

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XLII, p. 1264.
[2] *Annales de chimie et de physique*, 2ᵉ série, t. XXXVII, p. 5.
[3] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XLIII, p. 916 et 1122.

la tension irait continuellement en augmentant, s'il n'y avait aucune perte ou recomposition des fluides. Il a alors mesuré les quantités d'électricité, en observant le temps nécessaire pour qu'une décharge se produisît par la rencontre des feuilles d'or d'un électroscope, avec ses lames de décharge; la rapidité du dégagement électrique était en raison inverse de ce temps. Voici les lois constatées par ce moyen :

1° La quantité d'électricité que produit une tourmaline qui se refroidit, est proportionnelle à la vitesse du refroidissement. On remarque, en effet, que l'électroscope donne un plus grand nombre de décharges dans le même temps quand on active le refroidissement de la tourmaline par un courant d'air. L'expérience montre en outre que la quantité d'électricité dégagée pour un abaissement de $t°$, est constante, quel que soit le temps employé pour obtenir cet abaissement. Or, la quantité moyenne d'électricité dégagée en 1^s est en raison inverse de ce temps; il en est de même de l'abaissement de température en 1^s ou vitesse moyenne du refroidissement; les dégagements d'électricité sont donc bien proportionnels aux vitesses du refroidissement.

Pour vérifier la loi qui précède, il faut éviter avec soin les déperditions. Il faut aussi que la température de la tourmaline ne dépasse pas 150°; au-dessus, la conductibilité détruit une portion considérable des électricités produites: Il ne faut pas non plus que la tourmaline soit trop grosse, car alors le refroidissement ne serait pas le même dans toute son épaisseur, et les parties intérieures n'auraient pas immédiatement leur vitesse de refroidissement maximum.

2° L'échauffement développe autant d'électricité qu'un refroidissement égal de même vitesse. On avait cru pendant longtemps que l'échauffement donnait des effets moins prononcés; mais M. Gaugain a reconnu que les différences observées provenaient de deux causes : l'état hygrométrique des tourmalines froides, et la conductibilité de l'air chaud dans lequel on les échauffait. Quand on refroidissait au contraire la tourmaline, elle se trouvait bien desséchée et entourée d'air froid. M. Gaugain, pour éviter ces causes d'erreur, desséchait la tourmaline avant de l'échauffer, et il ne dépassait pas 100°, pour que l'air chaud fût à peine conducteur. Il disposait aussi l'électroscope de manière que les décharges fussent fréquentes Il a reconnu ainsi, qu'il faut sensiblement le même temps pour obtenir une décharge pendant le réchauffement et pendant le refroidissement. Ce temps a été, par exemple, pour 4 charges successives, 24^s; $21^s,8$; $31^s,6$; 51^s pendant l'échauffement, et 21^s; 22^s; $30^s,8$; $51^s,8$ pendant le refroidissement.

1483. Des différentes substances pyro-électriques. — La tourmaline n'est pas le seul cristal qui soit pyro-électrique. Canton a constaté la même propriété dans la topaze du Brésil; Brard, dans l'axinite, et Haüy, dans plusieurs autres substances. Ce dernier a reconnu que la pyro-électricité ne se rencontre que dans les cristaux qui dérogent à la loi de symétrie. L'extrémité la plus chargée de facettes, forme le pôle *antilogue*, comme chez la tourmaline.

M. Brewster a beaucoup augmenté la liste des cristaux pyro-électriques. MM. Rose et Reiss, qui ont fait un travail étendu sur ce sujet[1], n'ont pas obtenu d'électricité avec toutes les substances qu'il a signalées; mais, de même que certaines tourmalines ne sont pas électriques, de même les échantillons observés pouvaient former une exception parmi les cristaux de même espèce.

Les cristaux pyro-électriques sont : la *tourmaline*, la *topaze* et l'*axinite*, déjà citées ; le *silicate de zinc*, la *scolézite*, la *boracite*, la *rhodizite*, la *prehnite*. La *titanite*, le *spath pesant* et le *cristal de roche* donnent quelquefois des signes d'électricité quand on les chauffe vivement. Parmi les cristaux artificiels, M. Brewster cite le *sucre*, les deux *acides racémiques*, et surtout l'*acide urique*. Dans ces divers cristaux, l'axe électrique, ou la ligne qui joint les pôles électriques, ne se confond pas toujours avec l'axe cristallographique ; quelquefois il y a plusieurs axes électriques.

II. Courants thermo-électriques.

1481. I. CIRCUITS DE PLUSIEURS MÉTAUX. — M. Seebeck de Berlin a découvert, en 1821, que la chaleur peut produire des courants dans des circuits métalliques. Il composa un circuit fermé, avec un barreau de bismuth et une lame de cuivre soudés l'un à l'autre. Il fit ensuite chauffer l'une des deux soudures, et le circuit fut parcouru par un courant électrique assez intense pour dévier l'aiguille aimantée. Ce courant allait de la soudure chaude à la soudure froide par le cuivre. L'expérience se fait facilement avec l'appareil de la *fig.* 1105. La règle *ac* qui soutient le pivot de l'aiguille aimantée est en bismuth, et la lame de cuivre soudée en *a* et *c* passe par dessus cette aiguille. Au lieu de chauffer la soudure *a*, on peut la refroidir ; alors le courant change de sens.

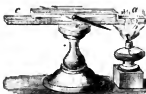


Fig. 1105.

M. Œrsted, en annonçant la découverte de M. Seebeck, a proposé de donner à cette sorte de courant le nom de *thermo-électrique*, et de désigner par courant *hydro-électrique* celui que produisent les piles ordinaires; dénominations généralement adoptées.

Tous les métaux peuvent, à différents degrés, donner des courants thermo-électriques. Pour les observer quand ils sont faibles, on introduit, comme l'a fait le premier M. Becquerel, un multiplicateur dans le circuit. Mais les électricités n'ayant qu'une faible tension et n'éprouvant que très peu de difficulté à se recomposer à travers la soudure, le multiplicateur doit être formé d'un gros fil ne faisant qu'un petit nombre de tours, afin qu'il ne résiste pas sensiblement

[1] *Archives de l'électricité* de M. A. de La Rive, t. III, p. 585.

au passage du courant. Le sens de ce courant dépend des métaux associés ; ainsi, dans un circuit formé d'antimoine et de cuivre, le courant marche en sens contraire de celui qu'on observe dans le circuit bismuth et cuivre. Dans la liste suivante, due à M. Cumming, chaque métal reçoit près de la soudure chaude, le fluide positif avec ceux qui le suivent, et le fluide négatif avec ceux qui le précèdent : *Antimoine*, *Arsenic*, *Fer*, *Zinc*, *Or*, *Cuivre*, *Laiton*, *Rhodium*, *Plomb*, *Etain*, *Argent*, *Manganèse*, *Cobalt*, *Palladium*, *Platine*, *Nickel*, *Mercure*, *Bismuth*.

L'antimoine et le bismuth sont aux extrémités de la série; ils donnent, quand on les réunit, le courant le plus intense. La liste qui précède diffère pour quelques métaux de celle qui a été trouvée par M. Yelin, par Nobili, et par M. Becquerel. Ce dernier physicien a donné la liste suivante :

6 *Antimoine*, 1 *Fer*, 2 *Zinc*, 4 *Argent*, 7 *Or*, 3 *Cuivre*, 5 *Etain*, 9 *Plomb*, 8 *Platine*, 10 *Bismuth*.

M. Becquerel remarque que cette liste ressemble à celle des mêmes métaux rangés par ordre de *capacités calorifiques ;* les premiers, qui prennent le fluide positif, ayant la plus grande capacité. Le chiffre qui précède le nom de chaque métal donne l'ordre des chaleurs spécifiques déterminées par M. Regnault (II, 897). La conductibilité et la structure cristalline de certains métaux ont aussi une influence qui explique les différences entre les deux séries ; nous verrons en effet que tout ce qui modifie la propagation régulière de la chaleur, détruit l'équilibre électrique, et détermine un courant.

Courant thermo-électriques avec des substances non métalliques. — On peut produire des courants thermo-électriques avec des corps conducteurs autres que les métaux, comme le peroxyde de manganèse, le persulfure de fer, la plombagine. Avec le platine, les deux premiers prennent le fluide *négatif*, et la plombagine, le fluide *positif*. Les liquides en contact avec les métaux donnent aussi des courants par la chaleur. Si l'on plonge dans de l'eau pure ou alcaline deux lames de platine réunies par un multiplicateur et dont l'une soit chaude et l'autre froide, la lame chaude prend le fluide *négatif*. C'est le contraire dans les acides. M. Mazoli a obtenu un courant, avec une colonne de mercure placée entre deux fils de platine : le mercure était renfermé dans un tube capillaire placé obliquement et dont il chauffait l'extrémité supérieure ; les deux fils étaient mis en relation avec un multiplicateur ; le courant marchait de l'extrémité chauffée à l'extrémité froide.

1185. Lois relatives à la température. — L'intensité magnétique des courants thermo-électriques augmente avec la différence de température des points de jonction. M. Becquerel a cherché les lois de ce phénomène [1]. Pour cela, il soudait deux fils métalliques l'un à l'autre par une de leurs extrémités, et les joignait, par l'autre, avec le fil d'un réomètre. Les points de jonction étant maintenus à la température de 0° au moyen de glace fondante, il élevait

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XLI, p. 358.

de plus en plus la température de la soudure, et observait les déviations correspondantes de l'aiguille du réomètre. De ces déviations, il concluait les intensités successives du courant, au moyen de tables que nous apprendrons à construire. Les expériences ont été faites sur les combinaisons métalliques suivantes : *fer-argent*, *fer-cuivre*, *cuivre-platine*, *argent-étain*, *cuivre-argent*. M. Becquerel a trouvé, pour ces métaux, que l'intensité du courant est proportionnelle à la température, jusqu'à 40° à 50°, l'une des soudures étant à 0°. Cette loi donne le moyen de construire facilement des tables analogues à celles dont s'est servi M. Becquerel, pour l'établir quand les déviations ne dépassaient pas 50°.

Si aucune des soudures n'est à 0°, l'intensité du courant n'est pas proportionnelle à la différence de leur température; mais, si l'on représente ces températures par t et t', l'intensité est égale à la différence entre les intensités qu'on obtiendrait si, l'une des soudures étant à 0°, l'autre était successivement aux températures t et t'.

Si l'on dépasse la limite de 50°, les lois qui précèdent ne se vérifient plus, l'intensité du courant croissant de moins en moins. L'accroissement est à peine sensible vers 300° pour un couple *cuivre-fer*, puis l'intensité du courant diminue, devient nulle au rouge sombre, et au-delà, le courant change de sens. Dans un couple *zinc-argent*, le changement de sens a lieu à 225°, et dans le couple *or-zinc*, un peu au-delà de 150°. M. Pouillet n'a pas remarqué de changement de sens dans le courant d'un couple de *fer-platine* pour les plus hautes températures. Il a constaté en outre que l'intensité magnétique d'un couple bismuth et cuivre est proportionnelle à la température d'une des soudures, l'autre étant à 0°, depuis — 78° jusqu'à 100°.

Les résultats trouvés par M. Becquerel restent les mêmes quand les métaux, au lieu d'être en contact, sont séparés par de la soudure, ou même par une tige formée de un ou plusieurs métaux, pourvu que les extrémités en présence, des métaux considérés, soient élevées à la même température que leur surface de jonction quand ils se touchent. Pour prouver ce point, M. Becquerel a formé un circuit composé de plusieurs métaux soudés les uns à la suite des autres : cuivre C (*fig.* 1106), fer F, platine P, étain E, zinc Z, argent A, or O. Les extrémités de la série sont mises en rapport avec le fil d'un réomètre, et l'on trouve que la déviation est la même quand, toutes les autres soudures étant à 0°, on échauffe à 40°, seulement la soudure a, qui joint du fer à du cuivre ; ou simultanément les soudures b et c, ou d et e, entre lesquelles le fer et le cuivre sont séparés par du platine ou de l'étain, ou encore les soudures b, g, entre lesquelles le fer et le cuivre sont séparés par des fils de platine,

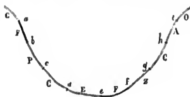


Fig. 1106.

cuivre, étain, fer, zinc. Ce résultat montre bien que le courant produit est dû au mouvement de la chaleur, et non au contact des métaux.

1486. Comparaison des pouvoirs thermo-électriques. — On désigne par *pouvoirs thermo-électriques relatifs* des couples de métaux réunis deux à deux, les intensités relatives des courants qu'ils fournissent quand on élève la soudure à une température donnée, tous les autres points de jonction qui peuvent exister dans le circuit étant maintenus à 0°. Pour comparer les pouvoirs des différents métaux, il faut évidemment que le circuit reste le même dans toutes les expériences. M. Becquerel a employé le circuit (*fig.* 1106); toutes les soudures étaient à 0°, excepté celle qui joignait les métaux considérés, laquelle était portée à 20°. Le tableau qui suit fait connaître les résultats obtenus. Les deux métaux associés sont placés l'un au-dessus de l'autre, celui qui prend le fluide positif en dessus.

+ / —	*Fer* / *Etain*	*cuivre* / *platine*	*fer* / *cuivre*	*argent* / *cuivre*	*fer* / *argent*	*fer* / *platine*	*cuivre* / *étain*	*zinc* / *cuivre*	*argent.* / *or.*
Déviations...	36°,50	16	34,50	4	33	39	7	2	1
Intensités...	31,24	8,55	27,96	2	26,20	36,07	3,50	1,0	0,50.

Nous verrons que si l'on forme un circuit avec un seul métal dont on rapproche les extrémités différemment échauffées, on obtient un courant dont l'intensité varie suivant ce qu'on nomme le pouvoir thermo-électrique particulier de ce métal. Cela posé, M. Becquerel a trouvé que l'intensité magnétique des courants produits en chauffant à $t°$ le point de réunion de deux métaux, est égale à la différence des intensités des courants qu'ils donneraient séparément, si leurs deux extrémités étaient, l'une à 0°, l'autre à $t°$. Ainsi, en désignant le pouvoir thermo-électrique particulier de chaque métal par l'initiale de son nom, on aurait, d'après le tableau qui précède, $F - C = 27,96$, et $F - P = 36,07$. Or, en retranchant ces deux égalités l'une de l'autre, on trouve $C - P = 8,11$, qui diffère peu du nombre 8,55 que donne l'expérience. De même, on a $F - E = 31,24$, et $C - E = 3,50$; d'où $F - C = 27,74$, et l'expérience donne 27,96. On peut donc dire que « l'intensité d'un courant thermo-électrique est égale à la différence des actions produites dans chaque métal par la même température. »

On peut, en combinant, d'après les principes qui précèdent, les intensités données par le tableau, trouver le pouvoir thermo-électrique particulier des métaux qu'il contient, quand on connaît celui de l'un d'eux. Par exemple, en désignant toujours par F le pouvoir du fer à 20°, on a $F - A = 26,20$, ou $A = F - 26,20$. On trouve de même $O = F - 26,70$; $Z = F - 26,96$; $C = F - 27,96$; $E = F - 34,24$; $P = F - 36$.

Malheureusement la détermination de F est très incertaine. M. Becquerel ayant remarqué que les pouvoirs thermo-électriques de l'argent, de l'or, du zinc et du cuivre sont à peu près égaux, et que la seule propriété calorifique

de ces métaux qui soit aussi la même, est leur pouvoir émissif, a supposé que le rayonnement à la surface de jonction était le même que dans l'air, et que la différence des pouvoirs émissifs déterminait le sens et l'intensité du courant. On aurait alors, en prenant pour les pouvoirs du fer et de l'or, les nombres 15 et 12 donnés par Leslie $F : F - 26,70 = 15 : 12$; d'où $F = 133,50$. Il est alors facile de trouver pour les autres métaux : $A = 107,3$; $O = 106,8$; $Z = 106,54$; $C = 105,54$; $E = 102,26$; $P = 97,5$.

Les nombres ainsi obtenus correspondent à la température de 20° et à un circuit d'une conductibilité déterminée ; mais leurs rapports sont indépendants de ces deux circonstances. En effet, nous avons vu que l'intensité du courant donné par deux métaux, ou la différence d'action $F - C$, est proportionnelle à la température, jusqu'à 50°. De plus, l'expérience prouve que cette différence $F - C$ est aussi proportionnelle au pouvoir conducteur du circuit. Si donc on désigne par δ l'intensité pour une température de 1°, et pour une conductibilité du circuit représentée par 1, on aura, pour la température t et la conductibilité c, $F - C = \delta \times ct$. De même pour deux autres métaux, on aurait $F - P = \delta' \times ct$; d'où l'on tire $(F - C) : (F - P) = \delta : \delta'$. Les rapports entre les pouvoirs thermo-électriques sont donc les mêmes quel que soit le circuit et la température, pourvu que celle-ci ne dépasse pas 50°. Ce résultat a été vérifié, en employant un circuit différent, dont les soudures étaient portées à 20°.

Comme vérification des principes qui lui ont servi à trouver les pouvoirs thermo-électriques des métaux, M. Becquerel a fait le calcul qui suit : on sait que lorsque la température est la même dans tous les points d'un circuit composé de plusieurs métaux, le courant définitif est nul. On doit donc trouver une somme nulle en ajoutant les nombres qui représentent les intensités des courants produits à chaque soudure, et en affectant du signe + ceux qui vont dans un sens, et du signe — ceux qui vont en sens opposé. Si, par exemple, on prend un circuit formé de fer, platine, argent, cuivre, fer, on trouve, pour la température de 20° :

$F - P = 133,5 - 97,5 = 36$	$P - A = 97,5 - 107,3 = -9,80$
$A - C = 107,3 - 105,54 = 1,76$	$C - F = 105,54 - 133,55 = -27,96$

nombres dont la somme algébrique est nulle.

1487. Expériences de M. Gaugain. — Il nous reste à trouver l'explication des différences qui se remarquent entre les séries thermo-électriques des métaux, données par divers expérimentateurs. Nous en trouvons les principaux éléments dans un travail de M. Gaugain[1]. Cet habile observateur fixait deux fils métalliques égaux, aux extrémités du fil du réomètre, les appuyait l'un sur l'autre, en croix, et chauffait l'un d'eux près du point de jonction, et

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XXXVI, p. 612 et 645.

non au point de jonction. Il a reconnu que la direction du courant peut dépendre d'un peu d'oxyde formé à la surface de contact, ou même d'une couche imperceptible déposée sur les métaux quand on les plonge dans la partie bleue d'une flamme d'alcool, effet qu'il indique en disant que le métal a été *carburé*. Ainsi, des couples formés d'un fil de zinc décapé, appuyé légèrement sur un fil d'or, d'argent ou de cuivre, donnent un courant qui ne dépend pas du point où l'on applique la chaleur, et qui va du fil froid au fil chaud par le réomètre. Mais quand la surface de contact a été fortement échauffée, de manière à ce qu'il se soit formé un peu d'oxyde de zinc, le courant marche en sens inverse.

Quand les deux fils bien décapés, sont fortement pressés l'un contre l'autre, de manière que l'oxydation ne puisse avoir lieu à la surface de jonction, on trouve que le sens du courant, toujours indépendant du point échauffé, peut varier avec l'élévation de la température. Ainsi, dans les couples formés avec l'argent uni à l'or, et avec le fer uni à l'or, l'argent ou le cuivre, le courant va de l'or à l'argent, ou du fer à l'autre métal par le réomètre, tant que la température n'atteint pas le rouge sombre. Au-delà, le sens du courant change. M. Gaugain n'a pas trouvé, comme M. Becquerel, de changement de sens dans les couples or-zinc et argent-zinc, quoiqu'il eût chauffé jusqu'à la fusion du zinc. Ces expériences ont été faites sur les métaux les plus purs qu'on trouve dans le commerce. De petites différences de pureté peuvent déterminer le changement de sens du courant, quand les pouvoirs thermo-électriques des métaux en contact diffèrent peu : ce qui explique aussi les différences entre les résultats obtenus par divers physiciens.

1488. Piles thermo-électriques. — Peu de temps après la découverte de M. Seebeck, Fourier et Œrsted réunirent plusieurs alternatives de barreaux de deux métaux différents, pour obtenir une plus forte tension, comme dans les piles de Volta quand on rassemble plusieurs couples. Ils formèrent d'abord un circuit polygonal au moyen de trois barreaux de bismuth, alternant avec trois barreaux d'antimoine, le disposèrent horizontalement, et posèrent une aiguille aimantée, sur une pointe, portée par un des barreaux placé dans le méridien magnétique. Ayant chauffé une ou plusieurs soudures, ils reconnurent que la déviation de l'aiguille était d'autant plus grande qu'il y avait plus de soudures échauffées, en ayant soin de ne jamais chauffer deux soudures consécutives. La *fig.* 1107 représente une autre disposition, avec laquelle ils purent chauffer et refroidir facilement les soudures alternatives ; chaque barreau de bismuth se recourbe et plonge dans de la glace.



Fig. 1107.

M. Pouillet a imaginé une autre disposition : chaque couple est formé d'un barreau de bismuth en forme de fer à cheval B (*fig.* 1108); à ses extrémités, sont soudées des bandes de cuivre *c*, *c'* qui se relèvent de part et d'autre, et

se recourbent pour aller se souder au bismuth des couples suivants. Les soudures s'enfoncent dans des vases pleins, alternativement, d'eau chaude ou de glace fondante. Les couples sont fixés à la barre *ab*, au moyen de laquelle on peut les soulever, pour remplir les vases.

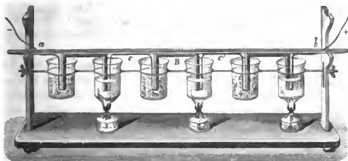


Fig. 1108.

On forme encore des piles thermo-électriques au moyen de tiges de fer et de cuivre soudées alternativement, comme on le voit dans la *fig.* 1109. Les soudures d'ordre pair sont d'un même côté, et les soudures impaires du côté opposé. On courbe l'ensemble du système de manière à pouvoir plonger toutes les soudures qui sont d'un même côté, dans une même auge. En *a* est un liquide chaud, et en *b* de la glace. Les liquides sont tellement peu conducteurs, pour les faibles tensions des courants thermo-électriques, que l'électricité ne passe pas d'un couple à l'autre, à travers les liquides des auges.

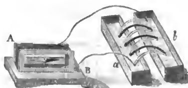


Fig. 1109.

Œrsted et Fourier avaient reconnu que l'intensité du courant thermo-électrique est proportionnelle au nombre des couples en activité, c'est-à-dire dont on chauffe une des soudures. Ce résultat, confirmé depuis, peut se vérifier facilement au moyen de la pile *ab* (*fig.* 1109), dont on plonge dans les auges *a* et *b*, un nombre plus ou moins grand de soudures.

Dans cette manière de procéder, le circuit reste toujours le même ; mais si la pile était composée successivement d'un nombre différent de couples, tout étant semblable du reste, on trouverait la déviation indépendante du nombre de couples : c'est que, ici, comme dans les piles hydro-électriques, les pôles ne reçoivent que les électricités produites par les couples extrêmes ; les couples intermédiaires ne faisant qu'opposer une résistance à la recomposition des fluides qui se portent aux pôles, et permettant, par conséquent d'obtenir

une tension plus grande, quand le circuit extérieur présente des résistances à vaincre. M. Pouillet, qui a vérifié ces résultats, les a rattachés à des lois remarquables sur la conductibilité, dont nous parlerons plus tard.

Effets des piles thermo-électriques. — Il résulte de ce qui précède, que les piles thermo-électriques, qui dévient si facilement l'aiguille aimantée quand le circuit extérieur n'oppose pas de résistance, ne peuvent produire d'effets physiques et chimiques, que lorsqu'elles sont composées d'un très grand nombre de couples, ce qui augmente dans une grande proportion la résistance intérieure. M. Botto est parvenu à décomposer l'eau, au moyen d'une pile de 120 couples [1] : 120 morceaux de platine de $\frac{1}{4}$ millimètre de diamètre étaient soudés alternativement à 120 fragments de fil de fer de mêmes dimensions. Le système était enroulé en hélice autour d'une règle, de grosseur telle que toutes les soudures paires se trouvaient sur une même ligne droite. Ces soudures étaient chauffées au moyen d'une lampe à alcool ayant la longueur de l'hélice. M. Poggendorff a composé des piles aussi énergiques, en substituant au platine, l'*argentan* ou *packfong,* qui est beaucoup moins coûteux.

M. Becquerel a pu décomposer des sels avec un seul couple thermo-électrique formé de fer et de cuivre ; mais il avait soin de prendre pour électrodes plongeant dans la dissolution, des lames du métal même qui entrait dans la base du sel. L'attraction moléculaire exercée par le métal, sur les molécules de même nature entrant dans la composition du sel, favorise alors la décomposition. Un couple platine et fer ne peut donner les mêmes résultats, et cependant il dévie l'aiguille aimantée plus que le couple fer et cuivre ; cela tient sans doute à ce qu'il offre moins de résistance intérieure que ce dernier.

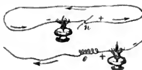
1489. II. COURANTS DANS UN CIRCUIT D'UN SEUL MÉTAL. — M. Seebeck avait obtenu des courants thermo-électriques de sens indéterminé, en chauffant simplement un point d'un circuit formé d'un seul métal à structure cristalline, comme le bismuth, l'antimoine. M. Becquerel a pu obtenir des résultats constants, au moyen de métaux homogènes, comme le cuivre, le platine, en faisant en sorte que la chaleur se propageât d'une manière différente de part et d'autre du point échauffé [2]. Il prit d'abord un réomètre à fil court en platine, dont il roula en spirale les extrémités; il chauffa au rouge l'une des spirales, et l'appliqua sur l'autre. Il obtint ainsi un courant allant de la spirale froide à la chaude par le réomètre. La spirale chaude prend donc le fluide négatif. Des spirales d'argent donnent le même résultat. Il en est de même du cuivre, mais il faut que la spirale chaude soit légèrement oxydée. Une couche très mince de mercure, d'étain, d'or ou d'argent pur, produit le même effet que l'oxydation.

Si l'on se contente d'accrocher l'un à l'autre, en *n* (*fig.*1110), deux fils de cuivre, de laiton ou d'acier, et qu'on chauffe l'un d'eux auprès du point de

[1] *Bibl. univ. de Genève* (Sciences et arts), t. LI (1832), p. 337.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXIII, p. 139.

jonction, on obtient encore un courant quand il s'est formé un peu d'oxyde ; ce courant va du fil froid au fil chaud par le réomètre. Si l'on rapproche peu à peu la flamme du point de jonction, et qu'on le dépasse, le courant s'affaiblit, devient nul et reparaît en sens contraire. Ce courant n'est pas dû, du moins entièrement, à l'action chimique qui produit l'oxydation ; car, avec les métaux trés oxydables, comme l'antimoine, le zinc, le fer, le courant va de la partie chaude à la partie froide par le réomètre, tandis que l'action chimique donnerait le fluide négatif à la partie chaude, qui s'oxyde le plus.


Fig. 1110.

Le platine ne donne pas de courant dans les mêmes conditions ; c'est que sa surface ne s'oxydant pas au point de jonction, la chaleur n'éprouve pas de difficulté à le franchir. Mais on peut obtenir un courant avec un fil continu de platine mis en relation avec un réomètre, en contournant en hélice une portion de ce fil, *o* (*fig.* 1110), et chauffant à côté. Le courant va de l'hélice au point chauffé, par le réomètre. M. Magnus a cru pouvoir expliquer ce résultat par une différence de structure dans la partie contournée du fil de platine ; mais M. Gaugain ayant montré que le courant ne se manifeste qu'autant que les plis de l'hélice sont appuyés les uns sur les autres, on ne peut admettre cette explication. On obtient encore un courant, en réunissant les extrémités de deux fils de platine de grosseur différente, et chauffant auprès du point de jonction.

On peut obtenir des courants thermo-électriques au moyen de substances non métalliques : Nobili ayant attaché deux cylindres d'argile au fil d'un réomètre, obtint un courant, en appuyant la base rougie de l'un d'eux, sur la base de l'autre. M. Matteucci a obtenu un résultat analogue avec des cylindres de charbon, dont un était échauffé, mais pas assez pour s'allumer.

M. Becquerel a encore obtenu des courants thermo-électriques avec des fils de platine séparés l'un de l'autre, et mis en communication par la flamme conductrice qui les échauffait [1]. Nous avons vu, à la vérité, que la combustion des gaz produit de l'électricité (1445) ; mais on peut opérer de manière à éloigner l'influence de cette cause : on plonge un fil de platine terminé en spirale, dans l'alcool d'une lampe allumée, et une autre spirale, transversalement dans la flamme, de manière qu'elle en traverse toutes les couches, qui sont, comme nous savons, électrisées différemment. On obtient alors un courant qui va, par le réomètre qui réunit les deux fils, de la spirale froide à celle qui se trouve dans la flamme. Pour prouver encore mieux l'origine thermique de ce courant, M. Becquerel porte à 0° la spirale qui plonge dans l'alcool, en entourant la lampe de glace fondante, et il remplace la spirale de la flamme par un petit vase en platine rempli de glace. Tant que la glace n'est pas entièrement

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XLII, p. 406.

fondue, il n'y a pas de courant, parce que les deux fils sont à la même température.

M. Gaugain a étudié les courants thermo-électriques produits par un seul métal, en employant la méthode que nous avons indiquée ci-dessus (1487). Il a reconnu des changements dans le sens du courant quand le métal était oxydé ou *carburé* à la surface de contact.

1490. Influence de la structure. — On peut encore obtenir des courants dans un fil continu, quand sa structure est différente dans deux parties de sa longueur, par exemple quand une partie est écrouie et l'autre recuite. Ainsi, M. Sturgeon a constaté, qu'un barreau d'acier mis en rapport avec un réomètre, et dont l'une des extrémités seulement est trempée, donne un courant qui va de la partie douce à la partie dure, par le réomètre, quand on le chauffe au milieu. Le cuivre donne un résultat analogue, mais le courant va dans le sens opposé. M. Mousson a observé beaucoup de faits de cette nature.

M. Magnus a répété et varié ces expériences [1]. Il a constaté qu'un fil écroui par la filière, puis recuit dans une partie de sa longueur, à laquelle on applique la chaleur, donne un courant quand ses extrémités sont réunies par un réomètre. On peut encore opérer avec un fil entièrement recuit, dont on écrouit une partie avec le marteau. Pour que la chaleur ne modifiât pas l'état de structure du fil, la température n'était portée qu'à 100° ; le fil était tendu dans un tube de verre horizontal traversant un vase en fer-blanc rempli d'eau bouillante. Les extrémités du tube étaient fermées par des tampons de coton. M. Magnus a trouvé, avec cet appareil, que le courant va, par le réomètre, de la partie écrouie à la partie recuite, dans des fils de *laiton, argent; acier, cadmium, cuivre, or, platine;* et de la partie recuite à la partie écrouie, avec des fils d'*argentan, zinc, étain, fer*. Les métaux les premiers inscrits dans les deux séries, donnent les courants les plus intenses.

Pour augmenter l'intensité du courant, M. Magnus prend un long fil dont il écrouit des portions égales séparées par des intervalles de même longueur. Il enroule ce fil sur un châssis, de manière que les points de séparation des parties recuites et des parties écrouies soient alternativement de deux côtés opposés, et il chauffe tous les points qui sont d'un même côté. Il forme ainsi une espèce de pile thermo-électrique, disposée d'une manière analogue à celle de M. Botto (1488). M. Magnus a aussi fait beaucoup d'expériences sur des fils identiques appuyés l'un sur l'autre après avoir été portés à des températures différentes. Il a remarqué que le courant change quelquefois de sens peu d'instants après le contact, ce qui peut servir à expliquer le désaccord entre certaines observations faites par divers physiciens.

1491. De la cause des courants thermo-électriques. — Pour expliquer la formation des courants thermo-électriques, M. Becquerel admet en

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXIV, p. 105.

principe que la propagation de la chaleur dans un conducteur, est accompagnée d'un mouvement d'électricité. Si tout est semblable de part et d'autre du point échauffé, on a deux courants contraires et égaux qui s'entre-détruisent; mais s'il existe des circonstances qui modifient la propagation de la chaleur d'un côté plutôt que de l'autre, l'un des courants l'emporte sur l'autre, et peut être reconnu. Or, c'est ce qui a lieu quand on réunit deux métaux différents; quand il y a solution de continuité ; ou différence de structure, comme dans les métaux à structure cristalline. L'inégalité dans l'arrangement des molécules est surtout nécessaire, comme le fait remarquer M. de La Rive, et cette opinion est corroborée par l'expérience suivante de M. Magnus : ayant fait amincir sur le tour, un cylindre de cuivre dans sa partie moyenne, il n'obtint aucun courant quand il échauffait un point où avait lieu le changement de diamètre, quoique la chaleur dût se propager inégalement de part et d'autre de ce point.

Il résulte de là que les liquides, qui n'ont pas de structure, ne doivent pas donner de courant thermo-électrique; c'est, en effet, ce qui résulte des expé-



Fig. 1111.

riences de M. Matteucci et de M. Magnus. Le premier[1] prenait trois capsules pleines de mercure, dont les deux extrêmes étaient mises en relation avec un réomètre au moyen de fils de platine, et avec la capsule du milieu, au moyen de siphons de verre pleins de mercure. Ayant enlevé un des siphons, il chauffait la capsule moyenne, et replaçait le siphon de manière à mettre en contact le mercure froid qu'il contenait, avec le mercure chaud de la capsule; il n'observait pas de courant. Il est arrivé au même résultat négatif, en opérant avec deux portions de bismuth, fondues et portées à des températures différentes. Cependant, le bismuth est meilleur conducteur à l'état liquide qu'à l'état solide.

M. Magnus a confirmé ainsi les résultats obtenus sur le mercure[2] : ce liquide est renfermé dans deux systèmes de tubes en verre AC, BD (*fig.* 1111) ; en A et B, aboutissent les fils de platine d'un réomètre. Après avoir chauffé le mercure de l'entonnoir C, on y plonge l'extrémité du tube D; ou bien on chauffe l'extrémité D et on la plonge en C dans le mercure froid. Dans les deux cas, on n'observe pas de courant. Cependant M. Vorsselman de Heer et Peltier avaient observé des courants thermo-électriques avec le mercure; mais cela

[1] *Bibl. univ. de Genève* (Nouvelle série), t. XII, p. 211, et XIII, p. 199.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXIV, p. 105.

tient sans doute à ce qu'ils n'évitaient pas complètement le contact du mercure chaud avec l'un des fils du réomètre. Or, M. Matteucci a reconnu qu'il suffit qu'un de ces fils soit plus chaud que l'autre, pour obtenir un courant allant de l'extrémité chaude à la froide.

1492. Courants dans les métaux cristallins. — M. Seebeck avait obtenu des courants en chauffant simplement un point d'un circuit composé d'un seul métal à structure cristalline (1489). Ces courants se conçoivent facilement, d'après ce qui précède, et l'on comprend aussi pourquoi le sens en est indéterminé; car il dépend do l'arrangement accidentel des rudiments de cristaux, de part et d'autre du point échauffé.

M. Yelin, et plus tard M. Sturgeon, ont obtenu de ces courants, en échauffant un point de masses cristallines isolées [1]. M. Yelin plaçait au-dessous d'une petite aiguille aimantée suspendue par un fil d'araignée, un barreau de bismuth dont une extrémité avait été chauffée. Quand la partie chaude était du côté du sud et au-dessous de l'aiguille, son pôle nord était dévié à l'est; il était dévié à l'ouest quand la partie froide se trouvait au-dessous de l'aiguille. Quand la partie chaude était du côté du nord, les effets étaient inverses. Les deux moitiés donnent des résultats égaux quand on chauffe le milieu du barreau, et les effets dépendent aussi de sa forme. Par exemple, quand il est coulé en prisme triangulaire, les trois faces ne produisent pas les mêmes effets : l'une produit la déviation vers l'est, l'autre vers l'ouest; la troisième n'a pas d'action.

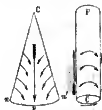


Fig. 1112.

M. Sturgeon a suivi, sur des masses de bismuth ou d'antimoine de diverses formes, la marche des courants à la surface. La *fig.* 1112 représente cette marche dans un cylindre, et dans un cône d'antimoine. La lettre C indique la partie échauffée, et F la partie froide ; *n*C, *n'*C sont des lignes neutres, sur lesquelles l'aiguille n'est pas déviée. Dans le cône, les courants changent de direction quand, au lieu de chauffer le sommet, on chauffe la base.

Influence du point principal de clivage. — M. Faraday a remarqué dans le bismuth et l'antimoine cristallisés, un plan de clivage plus brillant que les autres, et dont on reconnaît également la direction quand on brise une masse assez grosse de ces métaux. M. Svanberg [2] a alors préparé des barreaux dans lesquels la longueur était perpendiculaire au plan principal de clivage, ou dans lesquels cette longueur était dirigée suivant l'intersection de ce plan avec un second plan de clivage presque aussi marqué que le premier. Si l'on dispose bout à bout deux barreaux de la première espèce, et qu'on les chauffe auprès du point de jonction, on obtient un courant qui va du froid au chaud par le réomè-

[1] *Bibliothèque universelle de Genève* (Sciences et arts), t. XXIV, LXVII et LXVIII.

[2] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XXXI.

tre, tandis qu'avec deux barreaux de la seconde espèce, le courant va du chaud au froid.

M. Frantz a opéré autrement [1]; il taillait des cubes de bismuth ou d'antimoine de manière que le plan principal de clivage fut parallèle à l'une des faces, ou fit un angle de 30° avec elle, et, par conséquent, de 60° avec la face adjacente. Deux de ces cubes étant pressés l'un contre l'autre et mis en communication avec un réomètre, il chauffait la ligne de contact avec un cylindre de verre brûlant. Suivant la position relative des plans de clivage dans les deux cubes, il avait un courant plus ou moins fort. Le courant était nul quand les plans étaient parallèles à la face de contact, ou formaient des angles égaux de part et d'autre de cette face. M. Matteucci a vérifié ces résultats; il a pu aussi développer dans le bismuth, par la compression, des propriétés analogues à celles que lui communique la cristallisation.

Points neutres. — L'influence de la structure se montre encore dans les phénomènes suivants : M. Sturgeon ayant coulé du bismuth ou de l'antimoine sous formes de cadres ou d'anneaux, remarqua en différents endroits des *points neutres*, c'est-à-dire des points qu'il pouvait échauffer sans obtenir de courant. Mais s'il chauffait à droite ou à gauche d'un point neutre, il obtenait des courants de sens opposés. M. Sturgeon chauffait avec une lampe à alcool. Le courant était indiqué par une petite aiguille *e* (*fig.* 1113), rendue presque astatique au moyen d'un aimant voisin. Chaque flèche fait connaître le sens du courant *qui parcourt tout le cadre*, quand on chauffe un point quelconque placé à côté d'elle. Les lettres *n* indiquent des points neutres. Les résultats de la figure ont été observés avec un certain cadre de bismuth; avec un autre cadre, ils pourraient être différents. Au nombre des points neutres, on remarque toujours le point par où le métal a été coulé dans le moule.

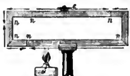


Fig. 1113.

M. Matteucci a repris ces expériences, et il a reconnu que les points neutres se trouvent aux endroits où un refroidissement rapide, ou toute autre cause, a déterminé une cristallisation très irrégulière; la cassure y présente des grains très fins. Si l'on fait fondre et refroidir lentement dans le moule le cadre de bismuth ou d'antimoine, les points neutres disparaissent, et il s'en montre d'autres partout où il se forme une boursouflure. On peut aussi produire de ces points à volonté, en refroidissant rapidement, au moyen d'un filet d'eau, une portion du cadre aussi petite que possible. Il résulte de là, qu'un point neutre peut être assimilé à une solution de continuité à côté de laquelle on applique la chaleur. Dans le bismuth, le courant va à travers le point neutre de la partie froide à la partie chaude; c'est le contraire dans l'antimoine.

[1] *Bibliothèque de Genève* (Archives des sciences), t. XVIII (1851), p. 297.

[2] *Bibl. de Gen.* (Sc. et Arts), t. XLVII (1831), p. 351, et t. XVIII (1838), p. 353.

1493. **APPLICATIONS A LA MESURE DES TEMPÉRATURES.** — L'idée d'employer les effets thermo-électriques à la mesure des températures est due à M. Becquerel. Nobili construisit ensuite une pile destinée à remplacer le thermomètre de contact de Fourier (II, 803), et Melloni la modifia et l'appropria à l'évaluation des effets de la chaleur rayonnante par la déviation de l'aiguille d'un réomètre à gros fil. Des tables de graduation, construites pour chaque appareil, permettent de passer des déviations aux températures (II, 712). Nous avons aussi parlé de l'*aiguille thermo-électrique* de M. Becquerel et de quelques uns de ses usages. Nous allons revenir sur ces applications importantes des phénomènes thermo-électriques.



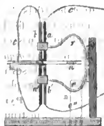
Fig. 1114.

Pyromètre magnétique de M. Pouillet. — Dans cet instrument, qui s'applique aux températures les plus élevées comme aux plus basses, le couple thermo-électrique est formé d'un tube en fer *ab* (*fig.* 1114), dont l'un des bouts *c* est fermé par un tampon de même métal, dans lequel est incorporée l'extrémité d'un fil de platine *oo'*. Ce fil est tendu suivant l'axe du tube, et vient se souder à une lame de cuivre *r'* fixée à une pièce de bois *f*. Un second fil de platine *r*, incorporé dans un tampon foré en fer *o'*, engagé dans l'extrémité *b* du tube *ab*, se soude à une autre lame en cuivre *r*. Les extrémités du fil du réomètre sont terminées par des chevilles métalliques qu'on enfonce en *r* et *r'*. L'extrémité *a* est plongée dans le milieu dont on veut obtenir la température. Quand celle-ci est très élevée, on préserve la partie *ca* en l'enveloppant d'une couche d'argile réfractaire, Cet appareil pourrait être employé avec avantage dans l'industrie ; il suffirait, en effet, dans ce cas, d'observer à quelle division s'arrête l'aiguille du réomètre quand la température est arrivée au point qui convient aux opérations que l'on veut exécuter. Les variations d'intensité qui peuvent survenir dans le magnétisme de l'aiguille, n'ont pas d'inconvénient; car elles affectent l'action de la terre, de la même manière que celle du courant.

M. Pouillet a construit des tables de graduation pour divers appareils semblables, en comparant leurs indications à celles de son pyromètre à air (II, 873). Les dimensions du réomètre étaient telles qu'une déviation de 4 ou 5° de l'aiguille correspondait à 100° de température. Le même physicien à reconnu que la force électromotrice moyenne correspondant à chaque degré de température, va en décroissant jusqu'au rouge naissant, puis augmente ; à 1000° environ, elle a à peu près la même valeur que vers 0°, et au-delà elle continue à augmenter assez rapidement.

Quand on ne veut pas dépasser 100°, il est préférable d'employer un couple de bismuth et cuivre, de la forme du couple B de la *fig.* 1108; les lames de cuivre c, *c'* sont mises en communication avec le réomètre; l'une des soudures

est plongée dans la glace fondante, et l'autre dans le liquide dont on veut évaluer la température. M. Pouillet a reconnu, en effet, que l'intensité du courant d'un semblable couple est proportionnelle à la température, de —78° à +100°. La température de —78° était obtenue au moyen du mélange de Thilorier (II, 965).


Fig. 1115.

Pince thermo-électrique de Peltier. — Cet instrument, destiné à évaluer la température des différents points d'un corps, consiste en deux couples très déliés *ab*, *a'b'* (*fig.* 1115), formés de bismuth *b*,*b'* et d'antimoine *a*,*a'*, et dont on applique les soudures de part et d'autre de la section de la tige *mn*, dont on veut connaître la température. Ces deux couples, réunis par un fil de cuivre *c*, communiquent avec un réomètre à fil court, au moyen des fils *c'*,*c''*. Un ressort *rr* soutient les deux couples, et les presse contre la tige *mn*. Quand on a affaire à un corps volumineux, on n'emploie qu'un seul couple, dont on appuie l'une des soudures sur le point considéré.

1494. Comparaison au thermomètre à mercure. — M. Regnault[1], dans son grand travail sur le thermomètre (II,872), a comparé les indications des appareils thermo-électriques, à celles du thermomètre à mercure[1]. Il a fait usage pour cela de deux couples différents : le premier, destiné aux températures ne dépassant pas 30°, est formé de deux demi-cylindres en bismuth et en antimoine appliqués l'un contre l'autre ABCD, A'B' (*fig.* 1116), et séparés par une lame d'ivoire, excepté aux extrémités A', A, D, où elles sont soudées l'une à l'autre. En *a* et *b* sont des boutons auxquels sont fixés les fils d'un réomètre. Ce couple a 20cm de longueur, et 12cm de hauteur; c'est le *couple normal* auquel on rapporte tous les autres. Les deux extrémités A et D sont plongées dans des vases séparés, remplis d'eau continuellement agitée, et à des températures différentes indiquées par des thermomètres à mercure. La *fig.* 1117 représente le couple destiné aux températures élevées : un fil de fer *ofo'*, de 1mm de diamètre, est soudé en *o* et *o'*, à deux fils de platine *oc*, *o'a*. Les soudures, faites à l'argent, sont plongées dans deux tubes de verre remplis d'une huile fixe ne contenant pas d'oxygène; l'un de ces tubes

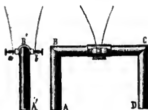


Fig. 1116.

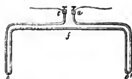


Fig. 1117.

[1] *Mémoires de l'Académie des sciences* de Paris, t. XXI, p. 240.

s'enfonce dans une chaudière pleine d'huile, à côté d'un thermomètre à mercure ou d'un pyromètre à air (II,873), et l'autre, dans un vase plein d'eau maintenue à une température constante. Les boutons *a* et *b* du couple normal, sont mis en rapport avec l'un des fils d'un réomètre différentiel (1441), et les boutons *a* et *c* du couple platine et fer, avec l'autre fil, de manière que les courants de ces deux couples marchent en sens contraire dans le réomètre, qui donne alors la différence de leurs intensités.

Cela posé, M. Regnault a fait varier, dans chaque expérience, la température de la soudure chaude du couple normal, jusqu'à ce que l'aiguille s'arrêtât dans le méridien magnétique. Alors les courants correspondants aux différences de température $T-t$, $T'-t$, $T''-t$... des soudures du couple fer-platine étaient égaux à ceux que déterminaient dans le couple normal les différences $\Theta-\theta$, $\Theta'-\theta$, $\Theta''-\theta$... des températures de ses soudures. Les résultats étaient consignés dans un tableau. Quand ensuite on voulait mesurer une température élevée, avec le couple platine-fer, on déterminait par l'expérience, avec le couple normal, la valeur de $\Theta-\theta$ convenable pour que le courant du couple fer et platine fût annulé, et l'on cherchait dans la table, la valenr de $T-t$ qui correspondait à cette valeur $\Theta-\theta$.

Pour connaître le degré de confiance que méritent les indications des couples thermo-électriques, M. Regnault a construit graphiquement les résultats obtenus dans plusieurs séries d'expériences. Il prenait pour ordonnées le tiers des différences $T-t$, et pour abcisses, le quintuple des différences $\Theta-\theta$. Les diverses séries lui ont donné des courbes qui différaient sensiblement, quoique ces séries eussent été faites dans les mêmes conditions. Il s'est trouvé des courbes qui présentaient des sauts brusques en certains points, de manière que la seconde partie de la courbe ne se raccordait pas avec la première. Ces résultats ne peuvent s'expliquer que par des changements opérés dans l'état moléculaire des métaux près des soudures; changements qui peuvent avoir lieu brusquement. Ces changements se montrent surtout avec le couple platine et fer; le couple normal, dans les limites de température où il est employé, donne des résultats assez réguliers. Une différence de 1° entre les deux soudures de ce dernier faisait toujours dévier l'aiguille du réomètre de 17°, *quelle que fût la température absolue des soudures*. M. Regnault a trouvé aussi qu'une augmentation de 1° dans la différence de $\Theta-\theta$ augmentait d'autant moins la force électromotrice du couple bismuth et antimoine, que cette différence était déjà plus grande. Pour constater ce résultat, contraire à l'opinion généralement admise, M. Regnault faisait passer un courant hydro-électrique faible dans l'un des fils du réomètre différentiel, puis il faisait passer dans l'autre fil, et en sens contraire, le courant du couple bismuth et antimoine, dont il faisait varier la température de l'une des soudures jusqu'à ce que l'aiguille se tînt à 0°. Il augmentait ensuite de 1° la température de cette soudure, et observait la déviation. Plus le courant hydro-électrique était fort, et par conséquent plus devait être grande la différence $\Theta'-\theta$, plus la déviation observée était faible.

Il résulte du travail de M. Regnault, que les courants thermo-électriques ne donnent pas des mesures exactes des températures élevées, puisque les résultats de plusieurs séries d'expériences faites dans les mêmes conditions peuvent différer sensiblement; l'avantage reste donc toujours au pyromètre à air. Mais les appareils thermo-électriques n'en sont pas moins très précieux à cause de leur sensibilité, et parce qu'ils permettent d'évaluer des effets calorifiques que les thermomètres proprement dits ne pourraient pas indiquer facilement; par exemple les effets de la chaleur rayonnante.

§ 1. — ÉLECTRICITÉ PHYSIOLOGIQUE.

I. Poissons électriques.

1495. Dans l'étude des différentes sources d'électricité, qui viennent d'être passées en revue, il est un fait qui n'aura pas échappé au lecteur attentif; c'est que toutes les actions qui engendrent de l'électricité sont aussi produites par l'électricité : ainsi, les actions mécaniques, les actions chimiques, la chaleur, sont des sources de fluide électrique; et ce fluide produit aussi des actions mécaniques, chimiques et calorifiques. On ne devra donc pas s'étonner de voir l'électricité prendre naissance dans les corps vivants, qui sont si sensibles à l'action de l'électricité; surtout si l'on considère le grand nombre de réactions chimiques dont ils sont le siége, et si l'on se rappelle que ces corps dégagent de la chaleur, et que la plupart des sources de chaleur sont aussi des sources d'électricité. Nous allons nous occuper en premier lieu d'un cas particulier très remarquable, celui d'animaux munis d'un organe électrique spécial, et nous remarquerons tout d'abord que ces animanx sont des poissons, c'est-à-dire qu'ils vivent dans un milieu bon conducteur.

1496. Des poissons électriques. — Les pêcheurs de l'Italie et de l'ancienne Grèce avaient remarqué un certain poisson plat ayant la propriété de donner des secousses *engourdissantes* quand on le touchait avec la main, et de tuer, ou au moins d'engourdir, pour s'en défendre ou en faire sa proie, les animaux qui passaient à sa proximité. Ce poisson a reçu le nom de *torpedo* (d'où l'on a fait *torpille*), pour rappeler cette propriété singulière. Platon fait mention de la torpille; Scribonius Largus, Galien et Dioscoride la citent comme propre à guérir, par ses commotions, la goutte et les maux de tête. Les modernes ont découvert d'autres poissons doués des mêmes propriétés. On chercha d'abord à expliquer les effets qu'ils produisaient, en disant qu'ils lançaient des *molécules engourdissantes*. Plus tard, Réaumur compara l'action de la torpille à celle d'un ressort qui se débande brusquement, ou à celle que produit quand on le touche, un corps qui vibre fortement. Lorsque Muschenbroeck eut découvert la commotion électrique, il compara aussitôt l'effet de la torpille à celui de la bouteille de Leyde. A partir de cette époque,

les poissons qu'on avait désignés d'abord sous le nom de *trembleurs*, *poissons engourdissants*, *poissons magiciens*, furent appelés *poissons électriques*. On en connaît aujourd'hui huit espèces : quatre *torpilles* (*Torpedo narke Risso*, *T. Galvanii*, *T. Marmorata*, *T. Unimaculata*), communes dans la Méditerranée et sur les bas-fonds marécageux des côtes occidentales de la France ; le *Gymnote électrique* ou *anguille de Surinam*, très répandu dans l'Orénoque et ses affluents ; le *silure électrique* (*malapterurus electricus*), qui se trouve dans le Nil et au Sénégal ; le *tétrodon électrique*, et le *Trichiure électrique*, qui habitent la mer des Indes. Le Gymnote est le plus grand de tous ; de Humboldt en a vu qui avaient près de 2^{m},50 de longueur.

Les poissons électriques ont tous la peau dépourvue d'écailles, et couverte d'une mucosité, qui, d'après Volta, conduit l'électricité beaucoup mieux que l'eau ; ils possèdent un organe particulier, nommé l'*organe électrique*. La torpille et le gymnote ont été étudiés d'une manière suivie, surtout la torpille, que nous considérerons particulièrement.

1497. Propriétés des poissons électriques. — La torpille (*fig.* 1119) est une espèce de raie pouvant avoir jusqu'à 0^{m},50 de longueur ; elle a été l'objet d'un grand nombre de recherches de la part de MM. Walsh, Gay-Lussac et de Humboldt, Becquerel....., et surtout de M. Matteucci.

Quand on touche avec la main une torpille vivante placée hors de l'eau, on reçoit une commotion d'autant plus forte que la surface de contact est plus étendue. Cette commotion, qui se fait sentir jusque dans l'épaule, est suivie d'un engourdissement analogue à celui que l'on éprouve quand on a comprimé le nerf cubital en se heurtant le coude. La commotion est plus intense, quand on applique les mains, l'une sur le dos et l'autre sous le ventre de l'animal ; M. Matteucci la compare à celle que donne une pile à colonne de 100 à 150 éléments, montée avec de l'eau salée.

La commotion peut être ressentie par 2 ou 3 personnes non isolées se donnant la main. Walsh l'a fait éprouver à 20 personnes formant la chaîne ; la première touchant le dos, et la dernière le ventre de la torpille.

La secousse peut être ressentie par l'intermédiaire d'un corps bon conducteur, par exemple de l'eau ; aussi les pêcheurs reconnaissent-ils qu'il y a une torpille dans leurs filets, quand, en jetant de l'eau à pleins sceaux, pour les laver, ils ressentent une commotion. C'est aussi à travers l'eau, que la torpille tue ou engourdit les poissons dont elle fait sa proie. On peut, au contraire, toucher impunément une torpille avec des corps mauvais conducteurs ; il suffit même, pour qu'on soit à l'abri de tout effet, de la plus légère solution de continuité dans un bon conducteur, comme d'un simple trait fait avec la pointe d'un canif dans une lame d'étain collée sur un bâton de verre.

Les commotions de la torpille dépendent de sa volonté ; on peut la toucher sans rien éprouver ; mais si on l'excite, par exemple en pinçant ses nageoires,

2 *Journal de physique*, t. IV, p. 205.

elle donne aussitôt plusieurs décharges, avec une rapidité prodigieuse. Quand l'animal est continuellement excité, il perd peu à peu son énergie, et ses commotions, de plus en plus faibles, finissent par devenir presque nulles, même quand il reste plongé dans l'eau. Ce n'est qu'après un long repos qu'il reprend toute sa vivacité. A la température de 0°, la torpille perd ses propriétés; elle les reprend dans de l'eau à 15 ou 20°. Dans l'eau à 30°, elle meurt bientôt en donnant un grand nombre de décharges.

Les commotions du gymnote sont formidables : de Humboldt ayant mis les deux pieds sur un de ces poissons qu'on venait de retirer de l'eau, reçut une commotion si violente, qu'il ressentit, le reste du jour, des douleurs dans presque toutes les jointures. Ces commotions sont assez fortes pour renverser un cheval : près d'Uritucu, dans la Colombie, on fut obligé de changer la direction d'une route, parce qu'elle coupait une rivière que les mulets devaient passer à gué, et où il en périssait tous les ans un grand nombre tués par les gymnotes. De Humboldt raconte comment, pour prendre ces poissons, les Indiens de Cumana poussent dans l'eau, des chevaux sauvages dont les piétinements font sortir les gymnotes de la vase. Ces anguilles jaunâtres et livides se pressent sous le ventre des chevaux, et leur font subir des décharges réitérées qui les renversent si violemment, que quelques-uns ne peuvent se relever et se noient. Quand les poissons sont épuisés après de nombreuses décharges, on les prend avec de petits harpons attachés à de longues cordes. Les sauvages, qui éprouvent souvent en se baignant la commotion du gymnote, l'appliquent à la guérison des paralysies; pratique autrefois usitée à la Guyane hollandaise. M. Faraday compare la commotion d'un gymnote, qu'il observa à Londres, à celle d'une batterie de 15 jarres, ayant 3,500 pouces carrés de surface armée.

1498. Origine électrique des propriétés de la torpille, etc. — Les effets de la torpille et des poissons analogues ressemblent tellement à certains effets de l'électricité, qu'on n'hésita pas à les attribuer à cette cause, dès qu'on eut découvert la commotion de la bouteille. Cette manière de voir a été confirmée par diverses expériences : Walsh obtint une étincelle avec le gymnote ; il constata aussi que le dos et le ventre de la torpille fournissent des électricités contraires; mais il ne put en observer l'étincelle. M. Matteucci et M. Linari, chacun de leur côté, sont parvenus à ce résultat. M. Matteucci étend l'animal entre deux plateaux métalliques isolés (*fig.* 1118); deux boules en métal *o*, soutenues par ces plateaux, portent des feuilles d'or placées à une très petite distance l'une de l'autre. Si l'on appuie sur le plateau supérieur, pour exciter la torpille, on voit souvent une petite étincelle jaillir entre les feuilles d'or.



Fig. 1118.

Davy a obtenu la déviation d'une aiguille aimantée, en mettant le fil d'un

réomètre en rapport avec la face dorsale et la face abdominale d'une torpille ; le courant va du dos au ventre par le réomètre. MM. Becquerel et Breschet, puis M. Matteucci. ont confirmé ce résultat. Davy a pu aussi produire des décompositions chimiques. M. Matteucci en obtient de la manière suivante : il place le poisson entre deux disques de platine isolés sur lesquels il étend des feuilles de papier trempées dans une dissolution d'iodure de potassium, et il les réunit par un fil de platine. Après un certain nombre de décharges, on voit apparaître l'iode sous forme d'une tache rougeâtre, du côté du ventre ; c'est-à-dire au point où le fil de platine apporte le fluide positif de la face dorsale.

Les différentes régions du corps de la torpille ne fournissent pas des quantités égales d'électricité ; ainsi, on peut la prendre par la queue sans éprouver de commotion. On peut reconnaître ce fait en faisant aboutir les fils d'un réomètre en différents points du dos et du ventre ; ou, comme l'a fait aussi M. Matteucci, en parsemant le corps du poisson, de membres de grenouilles préparées à la manière de Galvani (1427). On voit ces membres s'agiter à chaque décharge ; mais, à mesure que l'animal s'affaiblit, les convulsions disparaissent successivement aux différents points, et elles persistent le plus longtemps dans les membres de grenouilles placées aux côtés de la tête, précisément au-dessus des organes électriques.



Fig. 1119.

M. Faraday, qui a fait un grand nombre d'expériences sur un gymnote apporté vivant à Londres, a reconnu que la partie antérieure du corps est positive, et la partie postérieure, négative. Il a obtenu avec cet individu tous les effets des courants : l'étincelle, la déviation de l'aiguille aimantée, et des décompositions chimiques.

1599. De l'organe électrique. — L'organe électrique de la torpille a été décrit par Redi et Lorenzini, puis par Walsh et Hunter. Geoffroy Saint-Hilaire a fait connaître celui du gymnote, l'a comparé aux organes de plusieurs autres poissons, et leur a reconnu une structure commune.

L'organe électrique de la torpille *e* (*fig.* 1119) est composé de tubes aponévrotiques A, ayant la forme de prismes, le plus souvent hexagonaux, accolés les uns aux autres comme les alvéoles des abeilles. Ces prismes forment deux masses semi-lunaires *e* disposées symétriquement aux deux côtés de la tête, contre les branchies ; ils sont dirigés de la région dorsale à la région abdominale, et se soudent fortement par les deux extrémités à la peau, à travers laquelle on peut les distinguer. Chaque prisme est divisé transversalement par des cloisons membraneuses très rapprochées, formant des cellules remplies

d'une substance demi-fluide, composée de gélatine et d'albumine. On a été frappé, dès le principe, de l'analogie de forme de ces tubes avec la pile à colonne. Il y a ordinairement de 400 à 500 prismes dans chaque organe; Hunter en a compté jusqu'à 1180, dans une torpille de taille extraordinaire. L'organe est plus mince sur son contour qu'au milieu; il est enveloppé d'une membrane fibreuse facile à séparer des parties voisines. Enfin, de très gros troncs nerveux, partant du cerveau *c*, se ramifient dans chaque organe, et les dernières ramifications s'étalent en éventail sur les cloisons transversales des prismes.

Dans le gymnote, les prismes sont dirigés de la tête à la queue; ce qui explique pourquoi les pôles électriques sont placés dans ces régions du corps (1499). Dans le silure, ils sont aussi disposés longitudinalement; d'où l'on doit présumer que les électricités contraires se portent aussi aux extrémités opposées du corps. M. Pacini a publié un mémoire important sur la structure intime de l'organe électrique de plusieurs poissons [1].

Galvani et Spallanzani ont reconnu que, si l'on coupe ou si l'on comprime par une ligature les troncs nerveux qui correspondent à l'un des organes d'une torpille, on le rend impuissant; tandis que l'autre continue à donner des commotions. M. Matteucci, qui s'est livré à des recherches suivies sur ce sujet [2], a reconnu que, si l'on coupe certaines branches nerveuses, on paralyse la puissance électrique de la portion seulement de l'organe où elles se ramifient. Ayant séparé rapidement l'organe d'une torpille, en laissant cependant intacts les troncs nerveux qui l'unissaient au cerveau, et ayant couvert l'organe ainsi séparé, de membres de grenouille, il vit ces membres s'agiter, seulement sur les parties de l'organe recevant les branches nerveuses qu'il irritait. Le réomètre se prête aussi à ces sortes d'expériences.

M. Matteucci a encore reconnu que le lobe postérieur du cerveau, qui semble être un renflement de la moëlle allongée et d'où partent les troncs nerveux, est seul capable de déterminer des décharges, quand on l'irrite; il le nomme *lobe électrique*. Si l'on irrite ce lobe sur le côté, l'organe qui est du même côté donne seul des décharges. Quand la torpille est comme morte, ses branchies ne remuant plus, l'irritation du lobe électrique produit encore des décharges. Du reste, ce lobe et les nerfs qui se ramifient dans l'organe électrique n'ont qu'une seule fonction, celle de donner la décharge; ils ressemblent en cela aux nerfs des organes des sens. L'action nerveuse qui excite la décharge se propage dans le sens des ramifications des nerfs; car, si l'on coupe en deux, avec un rasoir, un organe électrique transversalement aux prismes, et qu'on irrite avec une pointe, un des nerfs visibles dans la section, on ne peut recueillir d'électricité que dans les portions de l'organe où le nerf se ramifie, et non dans celles qui sont plus rapprochées du cerveau. Une très petite portion de l'organe, détachée

[1] *Ann. de ch. et de ph.*, 2e s., t. LXVI, p. 396, et 3e s., t, XXI, p. 160, et LIX, 444.

[2] *Bibliothèque universelle de Genève* (Arch. des sc.), t. XXIV, p. 313.

du poisson vivant, peut donner des décharges quand on irrite d'une manière quelconque le filament nerveux qui s'y ramifie. Ces résultats se constatent avec le réomètre, ou avec des membres de grenouille dont on met un nerf bien séparé, en contact avec le point à explorer.

Voici maintenant comment M. Matteucci explique les effets des poissons électriques : chaque cellule est un organe électrique élémentaire, dans lequel l'électricité se produit indépendamment de l'action nerveuse, car un fragment cubique détaché de l'organe, donne, pendant 24 à 30 heures, une déviation constante de l'aiguille d'un réomètre à 24,000 tours. Quand l'action nerveuse se fait sentir, chaque prisme, composé de cellules superposées, devient analogue à une tourmaline ou à un aimant ; c'est-à-dire qu'il se forme à ses extrémités deux pôles contraires, d'autant plus chargés d'électricité que les cellules sont plus nombreuses. L'organe électrique est donc un appareil multiplicateur ; aussi, remarque-t-on que ce sont les prismes les plus longs, placés au milieu, qui donnent les plus fortes décharges. Celles que donne le gymnote ne sont pas aussi fortes qu'on pourrait le supposer en voyant la grande longueur des prismes ; c'est que les cloisons sont bien plus écartées que chez la torpille, et par conséquent les cellules moins nombreuses sur une longueur égale.

II. Courant musculaire.

1500. Du courant propre de la grenouille. — Lors de la discussion qui s'éleva entre Galvani et Volta, sur l'origine des contractions de la grenouille, le premier remarqua que l'on pouvait obtenir des mouvements très marqués, en mettant simplement quelques parties de muscles en contact avec des nerfs. Cette expérience se fait ordinairement de la manière suivante : après avoir préparé une grenouille à la manière de Galvani, on détache les nerfs lombaires, de la colonne vertébrale, en conservant seulement une portion de celle-ci pour les maintenir à leur partie supérieure (*fig.* 1120), puis on replie l'une des jambes, de manière à lui faire toucher le nerf; aussitôt on observe des contractions. Pour réussir, il faut employer des grenouilles fortes et très vives. Aldini a fait un grand nombre d'expériences, dans lesquelles il faisait communiquer les nerfs et les muscles de la grenouille, par l'intermédiaire de son propre corps, ou de cadavres d'animaux [1]. Galvani voyait dans ces résultats une confirmation nouvelle de ses idées sur l'électricité phy-



Fig. 1120.

[1] *Essais sur le galvanisme*, par Aldini (1804), t. I.

siologique, et nous avons vu (1428) comment Volta les rattachait à sa théorie du contact. En 1797, de Humboldt avança qu'il devait exister une électricité animale, indépendante de toute action physique ou chimique extérieure ; et en 1827, Nobili montra que les contractions, dans l'expérience ci-dessus, sont dues à un courant électrique dirigé des muscles aux nerfs dans l'intérieur de la grenouille ; c'est-à-dire que les muscles prennent le fluide négatif, et les nerfs, le fluide positif [1]. Pour prouver l'existence de ce courant, Nobili disposait les membres d'une grenouille récemment tuée et écorchée, de manière que les membres et les nerfs lombaires plongeassent séparément dans des capsules de verre remplies d'eau distillée (*fig.* 1121), et dans lesquelles s'enfonçaient aussi les extrémités du fil du réomètre à deux aiguilles, qu'il venait d'imaginer. Il obtint une déviation, indiquant un courant dirigé, dans le réomètre, des nerfs aux membres. Ce courant a été désigné sous le nom de *courant propre* de la grenouille. Cette découverte capitale de Nobili confirmait d'une manière inattendue les idées de Galvani. Nobili forma aussi des *piles* de plusieurs grenouilles arrangées dans le même ordre, dans une série de vases, et il obtint une déviation d'autant plus grande qu'il y avait plus d'éléments.


Fig. 1121.

M. Matteucci s'est occupé du courant de la grenouille dans plusieurs Mémoires étendus [2]. Il employait la méthode de Nobili : les extrémités du fil du réomètre étaient munies de lames de platine terminées en pointe, qu'il avait soin de plonger simultanément, et qui étaient couvertes d'un vernis isolant, excepté sur une étendue égale des deux lames. Il a aussi procédé en mettant simplement les lames de platine, préalablement mouillées, en contact avec les muscles et les nerfs de la grenouille étendue sur une table enduite d'un vernis isolant. Il a encore opéré sur des grenouilles entières écorchées, et enfin sur des grenouilles vivantes, en faisant sortir par une incision, un nerf lombaire qu'il touchait avec l'une des lames de platine, pendant que l'autre était mise en contact avec un tendon dénudé de la jambe. En réunissant des jambes de grenouille en série, de manière que le nerf qui sortait de chacune d'elles reposât sur les muscles de la suivante, il forma une *pile* donnant un courant plus intense que celui d'une grenouille entière fraîchement préparée.

1501. Grenouille réoscopique. — Dans ces expériences, le même physicien a souvent employé, au lieu de réomètre, la *grenouille galvanoscopique* ou *réoscopique*, dont l'usage avait été aussi indiqué par Nobili. On nomme ainsi une jambe de grenouille fraîchement préparée, munie d'un long filament nerveux, et introduite dans un tube de verre servant à l'isoler (*fig.* 1122). Si l'on met

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXXVIII, p. 225.
[2] *Ann. de ch. et de phys.*, 2e sér., t. LXVII, et LXVIII ; et 3e sér., t. VI, VII et VIII.

deux endroits du filament nerveux, en contact avec deux points du corps, dont on veut étudier l'état électrique, on observe des contractions qui indiquent la présence de l'électricité. Ce *réoscope*, d'une espèce particulière, peut aussi faire connaître la direction du courant qui circule dans le nerf entre les deux points touchés : si la jambe éprouve des contractions quand on introduit le courant, et ne bouge pas quand on le supprime, c'est que le courant marche dans le sens des ramifications du nerf; il marche en sens opposé, quand la contraction ne se produit qu'au moment où l'on ouvre le circuit. Pour bien juger du sens du courant par ce moyen, que nous expliquerons plus tard (1510), il faut attendre que la grenouille ait un peu perdu de son irritabilité.



Fig. 1022.

1502. COURANT MUSCULAIRE. — M. Matteucci a constaté que les nerfs ne sont pas nécessaires à la manifestation du courant propre : il prépara deux *piles* de six grenouilles aussi égales que possible; dans l'une, les membres étaient dépouillés de tout nerf visible, et dans l'autre, ces nerfs avaient été conservés. Ces deux piles ayant été opposées l'une à l'autre, il obtint un faible courant différentiel dans le sens de celle qui ne contenait pas de nerfs. D'autres expériences lui ont montré que l'intérieur du muscle donne de l'électricité positive, et l'extérieur, du fluide négatif : ayant fait une incision dans la cuisse d'une grenouille vivante ou fraîchement préparée, il enfonça l'une des extrémités du fil de platine d'un réomètre au fond de l'incision, l'autre touchant la surface du muscle, et il obtint un courant allant, *par le réomètre*, de l'extérieur à l'intérieur du muscle. Il forma aussi des *piles musculaires*, en réunissant des tronçons de cuisse de grenouille, comme dans la *fig.* 1123; et le courant fut d'autant plus intense qu'il y avait un plus grand nombre de tronçons. Ce courant allait, dans la pile, de la grande base de chaque tronçon à la partie la plus étroite, c'est-à-dire de l'intérieur des muscles à l'extérieur. Quand il y a des nerfs, ils jouent le même rôle que la partie intérieure des muscles.



Fig. 1023.

M. Matteucci a aussi constaté l'existence du courant musculaire dans divers animaux à sang chaud, pigeons, lapins, brebis, en faisant une plaie dans un muscle, et plaçant les extrémités du fil du galvanomètre, l'une au fond de la plaie, l'autre à la surface du muscle. Il a encore opéré en enfonçant l'extrémité du nerf de la grenouille réoscopique dans la plaie, et faisant toucher au bord, un autre point de ce nerf. Il a formé des *piles* musculaires avec des fragments de muscles de divers poissons, des tronçons de cuisses ou d'autres muscles, de lapins, de pigeons, ou d'oiseaux plus petits. Le courant augmente rapidement d'intensité avec le nombre des fragments, mais il s'affaiblit très promptement, et sa durée est d'autant plus petite que les animaux occupent une place plus élevée dans l'échelle des êtres.

1503. Loi du courant musculaire. — Dans les piles musculaires de grenouilles, le courant a une direction contraire à celle que l'on observe dans les expériences de Galvani et de Nobili (*fig.* 1120 et 1121) ; aussi, M. Matteucci a-t-il distingué avec soin ce qu'il appelle le *courant propre* des animaux, du *courant musculaire*. M. du Bois-Reymond a publié, dès 1842, une longue suite d'expériences faites au moyen d'un réomètre à 24000 tours, dans lesquelles il démontre l'identité de ces deux courants, en établissant la loi suivante [1] : *Le courant musculaire se manifeste toutes les fois qu'on fait communiquer, par un réomètre, un point de la surface latérale des faisceaux de fibres musculaires avec un point d'une section transversale naturelle ou artificielle de ces fibres.* Ce courant est dirigé, par le réomètre, de la surface latérale à la section transversale. On peut cependant obtenir un courant, en faisant communiquer deux points de la surface latérale : supposons, par exemple, un muscle cylindrique ; il n'y aura pas de courant si les extrémités du fil du réomètre sont également distantes des centres des bases ; mais si l'une des extrémités est plus près d'une des bases, il se manifestera un courant qui traversera le réomètre en partant de l'autre extrémité. Ce courant sera bien plus intense si l'on touche la base même du muscle.

Les nerfs, pendant leur vitalité, présentent les mêmes lois que les muscles, c'est-à-dire qu'ils donnent un courant sensible, dirigé dans le réomètre, de la surface latérale, ou de la section longitudinale, à la section transversale.

Quand on opère sur différents muscles, on trouve que le courant est d'autant plus intense que le muscle est destiné à agir plus fortement pendant la vie : ainsi, les muscles du cœur donnent un courant énergique, et ceux qui enveloppent les intestins n'en donnent qu'un très faible.

Si l'on détermine dans les muscles d'une grenouille des contractions tétaniques, c'est-à-dire continues, en irritant le nerf mécaniquement, ou par la chaleur, ou par des actions chimiques, le courant musculaire s'affaiblit aussitôt notablement. Ce changement dans l'état électrique des muscles peut réagir sur une grenouille réoscopique dont on poserait les nerfs sur les muscles que l'on fait contracter. A chaque contraction produite en excitant les nerfs, la grenouille réoscopique s'agite. Ce phénomène remarquable, connu sous le nom de *contraction induite*, a été découvert par M. Matteucci, et constaté par lui sur la grenouille et sur des lapins dont il débarrassait les muscles de la jambe, de leur enveloppe aponévrotique, et qu'il faisait contracter au moyen d'un couple voltaïque [2].

M. du Bois-Reymond ayant introduit dans le circuit du réomètre, les deux membres inférieurs d'une grenouille, n'obtint pas de courant ; mais ayant déterminé des contractions tétaniques dans l'une des jambes, en excitant le nerf qui s'y rendait, soit au moyen de l'azotate de strychnine, soit par des

[1] *Recherches d'électricité animale*, et *Annales de ch. et de ph.*, 3ᵉ série, t. XXX, p. 119.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 3ᵉ série, t. VI, p. 339.

moyens mécaniques ou physiques, il obtint un courant dirigé, dans le réomètre, du membre contracté à celui qui ne l'était pas. D'abord, les deux courants s'entre-détruisaient dans les deux jambes, puis la contraction ayant affaibli l'un d'eux, l'autre l'emporta et manifesta son existence.

1504. De l'origine du courant musculaire. — Quelle est l'origine des courants observés dans les diverses expériences que nous venons de rapporter? Faut-il y voir le résultat d'une action organique qui persiste quelque temps après la mort, ou un effet de ces actions chimiques variées qui s'accomplissent dans la profondeur des organes? L'électricité produite aurait alors une origine véritablement physiologique. Mais dans ces expériences, on a toujours opéré après avoir dépouillé ou blessé les animaux. On ne peut s'empêcher alors de soupçonner des actions chimiques *extérieures* produites, soit par les humeurs exsudées par les surfaces coupées ou mises à nu, soit par le contact de l'air sur ces surfaces. L'air exerce certainement des actions chimiques sur les tissus blessés, et ces actions contribuent à produire la douleur; ce qui explique pourquoi on peut couper, déchirer des muscles sans occasionner de douleur, quand on opère à l'abri du contact de l'air. Cependant des expériences directes ont conduit M. du Bois-Reymond à repousser l'idée d'attribuer l'électricité musculaire à l'action de l'air, et M. Matteucci rejette, d'aprés les siennes, l'action des fluides exsudés; il a vu aussi sa pile de muscles donner les mêmes résultats dans des gaz trés différents. Pour lever tous les doutes, il fallait observer sur des animaux vivants et intacts ; c'est ce qu'a fait M. du Bois-Reymond, dans l'expérience qui suit.

1505. Courant musculaire, par la contraction du bras. — Cette expérience capitale se fait de la manière suivante : on plonge les doigts des deux mains dans deux vases séparés, pleins d'eau salée, dans lesquels s'enfoncent des lames de platine communiquant avec le fil du réomètre à 2400 tours (*fig.* 1124). L'aiguille étant en repos, on contracte le plus fortement possible les muscles de l'un des bras, en serrant une barre de bois *ab*, et en ayant soin de ne pas remuer les doigts plongés dans l'eau salée; on voit alors l'aiguille se dévier, de manière à indiquer constamment un courant dirigé, dans le réomètre, du vase qui communique avec le bras non contracté, au vase opposé. Les résultats restent les mêmes quand on remplace l'eau salée par de l'acide sulfurique étendu, des dissolutions de potasse, azotate ou acétate de soude, sulfate de cuivre, de l'eau de source. M. du Bois-Reymond explique ce résultat en admettant l'existence préalable, dans les deux bras, de courants égaux qui s'entre-détruisent; quand on contracte l'un des bras, le courant qui lui correspond s'affaiblit (1503), et l'autre l'emportant, l'aiguille aimantée est déviée. Dans la grenouille dont on fait contracter un des membres, le courant est dirigé d'une manière contraire ; ce que M. du Bois-Reymond explique par la disposition différente des muscles dans le bras de l'homme et dans les membres de la grenouille.

On a cru pouvoir attribuer le courant observé, à la chaleur produite par la contraction, à la congestion sanguine ou à la transpiration qui pourraient l'ac-

compagner. M. du Bois-Reymond a étudié successivement ces différentes circonstances, et il a montré directement que, si elles produisent des courants, ils ont une direction contraire à celle que l'on observe pendant la contraction. M. Becquerel ayant contracté un des bras, et plongé les doitgs dans les vases, quelques instants après que la contraction eût cessé, observa un faible courant. M. du Bois-Reymond explique ce résultat par la persistance, après que la contraction a cessé, de la modification qu'éprouve le courant musculaire ; en effet, si l'on fait l'expérience à la manière ordinaire, on remarque que l'aiguille ne revient à l'état d'équilibre qu'avec une extrême lenteur, quand on cesse de contracter le bras. Du reste, M. Zantedeschi et M. Buff ont confirmé par de nouvelles expériences les résultats annoncés par M. du Bois-Reymond. M. Buff a aussi formé une chaîne de 16 personnes se tenant par les mains mouillées, et il a obtenu une déviation de 10 à 12° quand elles contractaient le même bras ; le

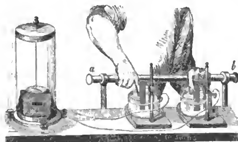


Fig. 1124.

courant changeait de sens quand elles contractaient l'autre bras [1]. Enfin M. du Bois-Reymond ayant enlevé, au moyen de vésicatoires appliqués sur la face dorsale de ses bras, l'épiderme mauvais conducteur, et ayant mis les deux parties dénudées en contact avec les lames du réomètre, obtint ainsi une déviation de 60 à 70°, tandis qu'elle n'était que de 2 à 3°, quand le réomètre communiquait avec les mêmes points garnis de leur épiderme.

Ces expériences rendent bien probable l'existence de courants électriques dans les animaux vivants. Ces courants sont dûs probablement, comme la chaleur animale, aux réactions chimiques multipliées qui s'accomplissent dans la profondeur des organes. Ils doivent jouer un certain rôle utile aux fonctions vitales. Aussi la nature a-t-elle mis des obstacles à leur passage au dehors, ce qui fait qu'il est très difficile d'en recueillir extérieurement la manifestation, quand l'organisme est intact, à moins qu'il n'y ait, comme dans les poissons électriques, un appareil destiné à condenser l'électricité. Nous trouverons dans l'étude des actions physiologiques produites par le courant de la pile, d'autres arguments en faveur de l'existence de l'électricité vitale chez les animaux (1517).

[1] *Bibl. univ. de Genève* (Archives des sciences), t. XIII, p. 150.

III. Electricité des végétaux.

1506. Electricité pendant la germination. — Dans ses recherches sur l'origine de l'électricité de l'atmosphère, M. Pouillet a fait l'expérience suivante [1] : il isola, dans une chambre fermée bien desséchée, douze capsules en verre recouvertes de vernis, et remplies de terreau humide dans lequel était semé du blé. L'intérieur des capsules communiquait par un fil métallique avec le plateau d'un électromètre condensateur. Tant que le germe des grains ne sortit pas de terre, le condensateur ne se chargea pas ; mais, au bout de trois jours, le germe étant sorti de terre, le condensateur, essayé à toute heure du jour et de la nuit, et pendant plus de huit jours consécutifs, se montra toujours chargé d'électricité négative. Des expériences faites avec des graines de cresson alénois et de giroflée de Mahon, donnérent des résultats semblables. Le condensateur se chargeant d'électricité négative, l'acide carbonique et la vapeur d'eau qu'exhalent les parties vertes des plantes, doivent emporter du fluide positif. C'est là, suivant M. Pouillet, une des sources de l'électricité atmosphérique, et il estime qu'une surface de 100 mètres carrés couverte de végétation, dégage en un jour assez d'électricité pour charger une forte batterie.

1507. Courants des végétaux. — M. Donné a obtenu des courants en enfonçant des fils de platine fixés au réomètre, l'un prés de la queue, l'autre prés de l'extrémité opposée de divers fruits. Dans les fruits à pépins, le courant va de la queue à l'œil; et en sens opposé, dans les fruits à noyau. Quand les fils sont enfoncés en deux points opposés pris à la même distance de la queue, il n'y a pas de courant. Les effets doivent être attribués à la réaction de sucs de nature différente accumulés du côté de la queue et du côté de l'œil, et qui réagissent chimiquement les uns sur les autres à travers le tissu cellulaire qui les sépare. En effet, si l'on coupe un fruit en deux transversalement, et qu'on exprime le jus des deux moitiés, dans des vases réunis par une mèche de coton mouillée, on obtient un courant dans un réomètre dont les fils plongent dans les deux vases. Si le fruit a été coupé de l'œil à la queue, il n'y a pas de courant.

MM. E. Wartmann [2] et Zantedeschi et M. Becquerel, chacun de leur côté, ont démontré l'existence de courants électriques dans les tiges, les racines et les feuilles des végétaux. Voici comment opère M. Becquerel [3] : ayant coupé une tige de jeune peuplier en pleine séve, et introduit l'un des fils en platine du réomètre, dans la moëlle, et l'autre dans une couche du ligneux ou du système cortical, il obtint un courant partant de la moëlle, allant en s'affaiblissant, à cause de la polarisation secondaire des fils de platine, et d'autant plus

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXXV, p. 414.

[2] *Bibl. univ. de Genève* (Arch. des Sc.), t. XV (1850), p. 301, et t. XVII. 149.

[3] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXI, p. 40.

intense, que le fil extérieur était plus près de l'épiderme. Si, quand ce dernier fil est tout prés de l'épiderme, on retire l'autre de la moëlle, pour le rapprocher de l'écorce, le courant s'affaiblit jusqu'à ce que le fil soit placé entre le bois et l'écorce, dans la couche de *cambium* qui les sépare. Le courant change alors de sens, et le fluide positif part de l'épiderme. Si l'on prend un morceau d'écorce détachée de l'arbre, et qu'on applique les fils du réomètre sur la face interne et sur la face externe dépouillée de son épiderme, on obtient encore un courant, mais il s'affaiblit beaucoup plus promptement que dans l'expérience précédente ; ce qui prouve que l'action de l'air a pour effet de faire disparaître les propriétés électriques. M. Becquerel a fait aussi beaucoup d'expériences sur des tubercules et diverses racines. Dans toutes ces expériences, il faut avoir soin d'éviter les effets de la polarisation des fils de platine.

M. Becquerel explique les courants dont nous venons de parler, par la réaction de la séve riche en oxygène qui monte dans le ligneux, sur la sève qui descend dans le tissu cortical et qui perd continuellement son oxygène. La séve ascendante se comporte comme un acide à l'égard de l'autre. Il suffit même de plonger dans l'eau, des aiguilles de platine que l'on vient d'enfoncer dans le ligneux et l'écorce, pour obtenir un courant produit par l'action chimique des sucs qui adhérent à la surface de ces aiguilles. Si l'on enfonce les aiguilles à la même profondeur dans l'écorce, en deux points placés sur la même verticale, on obtient un courant qui indique que l'aiguille inférieure prend le fluide négatif ; ce qui devait être, puisque la séve perd de plus en plus son oxygène, en descendant. Si l'aiguille inférieure est plongée dans le sol humide, à quelques mètres des racines du végétal, qui peut, du reste, être ligneux ou herbacé, on obtient un courant qui montre que l'aiguille plongée dans le sol reçoit l'électricité positive. Ce résultat s'explique en admettant que la sève ascendante communique aux racines l'électricité positive qu'elle prend dans sa réaction sur la séve descendante. Au lieu d'enfoncer l'une des aiguilles dans les couches extérieures du végétal, on peut la placer entre plusieurs feuilles superposées tenant encore aux branches. Si on l'enfonce dans le ligneux prés de la moëlle, on obtient peu ou point d'effet, comme on pouvait le prévoir. On voit que ces effets tendent à diminuer l'électricité négative du sol et doivent avoir une certaine influence sur l'état électrique de l'air. Enfin, les courants que l'on dérive à l'extérieur de la plante, tendent à prouver qu'il circule dans son intérieur, des courants électriques dans des directions diverses.

M. Buff a publié de nouvelles expériences, dans quelques-unes desquelles il avait soin de ne pas blesser ou mutiler les plantes sur lesquelles il opérait [1]. Deux vases contenant du mercure recevaient des fils de platine entourés d'un tube de verre et mis en rapport avec un réomètre ; sur le mercure était de l'eau dans laquelle étaient plongées les deux parties du végétal dont on voulait comparer l'état électrique. Quand ces parties étaient les feuilles et les racines,

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XLI, p. 198.

enlevées du sol sans les déchirer, et débarrassées de la terre qui les entourait, au moyen d'un courant d'eau, on constatait un courant allant des racines aux feuilles à travers la plante. Dans une branche séparée de la tige, le courant marchait aussi vers les feuilles. L'écorce jeune et fraîche, les boutons, les fleurs se comportent comme les feuilles. Dans les champignons, l'intérieur est négatif par rapport à la surface laissée intacte. M. Buff conclut, en général, que les racines et toutes les parties internes des plantes qui sont remplies de sucs, sont négatives, par rapport aux surfaces extérieures plus ou moins humides.

CHAPITRE IV.

EFFETS DE L'ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE.

1508. Nous avons vu que l'électricité accumulée *à l'état statique* sur les corps, ne peut produire les effets physiologiques, physiques, chimiques et magnétiques, qu'elle engendre quand elle se précipite avec explosion à travers les substances qui opposent une certaine résistance à son passage. L'électricité en mouvement dans les courants, produit les mêmes phénomènes, comme nous l'avons déjà montré (1438), mais d'une manière bien plus facile à observer, à cause de la continuité du passage de l'électricité. Nous allons, dans ce chapitre, considérer particulièrement les divers effets des *courants*, chercher les conditions dans lesquelles ils se produisent, et les lois auxquelles ils sont soumis. Nous ne parlerons pas ici des phénomènes magnétiques; ils feront l'objet d'un chapitre spécial, parce qu'ils se rattachent à une théorie très remarquable, au moyen de laquelle on est parvenu à expliquer tous les phénomènes magnétiques connus, et une foule d'autres observés plus tard, et qui sont venus la confirmer de la manière la plus inattendue.

§ 1. — EFFETS PHYSIOLOGIQUES DES COURANTS.

I. Effets sur les animaux morts.

1509. Les effets physiologiques consistent dans les phénoménes produits sur les animaux morts ou vivants et sur les végétaux; leur intensité dépend surtout du nombre des couples de la pile. Nous allons d'abord parler des expériences faites sur les animaux morts.

La première expérience à citer est celle de la grenouille de Galvani, qui amena la découverte de la pile (1427). Après l'invention de ce merveilleux appareil, plusieurs physiciens, particulièrement Galvani et Aldini, en firent usage pour expérimenter sur des animaux ou des parties d'animaux de grande taille. Aldini se servait d'une pile à colonne de 100 éléments, montée avec de l'eau salée [1]. Il soumit à l'action du courant, la tête d'un bœuf récemment tué; ayant fait communiquer, au moyen d'une tige métallique, l'intérieur d'une oreille mouillée d'eau salée, avec l'un des pôles de la pile, l'autre pôle communiquant avec un des naseaux, ou mieux avec l'autre oreille, il vit aussitôt les yeux tourner dans leur orbite, les oreilles et la langue s'agiter, et les naseaux s'enfler, comme dans la plus violente colère. Des cadavres de bœufs, moutons, chiens, lapins, poulets, lui ont aussi donné des mouvements analogues à ceux qui se produisent pendant la vie. De Humboldt ayant fait passer le courant de la pile, à travers le corps de poissons auxquels il avait coupé la tête, les vit sauter et donner des coups de queue. On a aussi opéré sur des insectes : Zanotti, de Bologne, ayant fait passer le courant à travers le corps d'une cigale récemment tuée, produisit le *chant* particulier à ce petit animal.

Les expériences les plus frappantes sont celles qu'on a faites sur des cadavres humains; Bichat avait fait quelques essais à ce sujet, lorsque la mort vint le surprendre. Aldini fit ensuite, à Bologne, des expériences suivies, sur les corps de deux criminels qui venaient d'être décapités; il put produire des mouvements énergiques dans les muscles de la face et de différentes parties du corps. Des expériences analogues ont été faites à Turin par Vassali, Julia, Rossi, et par différents observateurs en d'autres pays. Nous citerons en particulier celles qui ont été exécutées à Glascow par Andrew Ure sur le cadavre d'un supplicié qui était resté suspendu au gibet pendant prés d'une heure [2]. Les communications avec les pôles d'une pile de 270 couples, étaient établies au moyen de tiges terminées en pointe et munies de manches isolants. L'un des pôles de la pile ayant été mis en communication avec la moëlle épinière mise à nu au-dessous de la nuque, et l'autre pôle, avec une incision faite au talon, la jambe, préalablement repliée sur elle-même, fut lancée avec violence, et faillit renverser un des assistants qui cherchait à s'opposer à son extension. L'un des pôles ayant été introduit dans une incision faite au-dessus du cartillage de la septième côte, et l'autre pôle, mis en contact avec un nerf du cou (*phrénique gauche*), la poitrine se souleva et s'abaissa bruyamment, le diaphragme et les intestins furent refoulés et affaissés alternativement; en un mot, tous les mouvements qui accompagnent la respiration se produisirent.

Un nerf du sourcil (*supra-orbital*), ayant été touché avec l'un des pôles, pendant que l'autre était enfoncé dans l'incision faite au talon, les muscles de la face se contractèrent d'une manière effroyable. « La rage, l'horreur,

[1] *Essais sur le galvanisme* (1804), t. I, p. 98 et suivantes.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XIV, p. 344.

le désespoir, l'angoisse et d'affreux sourires unirent leur hideuse expression sur la face de l'assassin... A ce spectacle, plusieurs des spectateurs furent forcés de quitter l'appartement, à cause de leur effroi et de leur malaise, et un gentleman s'évanouit. » En faisant passer le courant, de la moëlle épinière au nerf ulnaire, dans le coude, ou à une légère incision faite à un doigt, on vit les doigts remuer vivement, et le bras s'agiter convulsivement, de manière que le mort semblait montrer au doigt les différents spectateurs. Du reste, tous ces mouvements étaient incertains et désordonnés.

Au lieu de cadavres venant de mort violente, Aldini voulut aussi expérimenter sur des corps morts naturellement, mais il n'obtint aucun effet; ce qui se conçoit, les propriétés dont jouissent les différentes parties de l'organisme s'étant toutes anéanties graduellement.

Les muscles qui ne sont pas soumis à la volonté, comme le cœur, la tunique musculaire de l'estomac ou des intestins, sont aussi susceptibles de se contracter pendant le passage d'un courant, contrairement à l'opinion de Volta. Le cœur, qui, après la mort, donne spontanément quelques rares pulsations, en donne de bien plus rapprochées après qu'il a été traversé par un courant. De Humboldt a vu le cœur d'une carpe qui ne donnait plus qu'une pulsation en 4 minutes, en donner 35, 31, 23, 12 et 3 pendant la 1re, la 2e, la 3e, la 4e et la 5e des minutes qui suivirent le passage du courant. Ces expériences sont surtout faciles à faire avec les animaux à sang froid; cependant de Humboldt a pu accélérer les pulsations du cœur sur un renard, un rat, des lapins; et Fowler sur divers autres animaux à sang chaud. Les organes de sécrétion subissent eux-mêmes l'influence du courant : Aldini ayant fait passer l'électricité à travers une des glandes salivaires de la tête d'un supplicié, obtint une sécrétion abondante de salive.

1510. Conditions et lois de la contraction. — La première condition pour qu'il y ait contraction, est que le courant parcoure les nerfs dans le sens de leur longueur; s'il ne fait que traverser les masses musculaires, il n'y a pas d'effets, à moins que le courant, trés énergique, ne vienne à rencontrer des ramifications nerveuses qui s'y distribuent. On sait que, si l'on irrite les nerfs au moyen d'actions mécaniques, avec un fer rouge, ou par des acides, on obtient des contractions; si l'on fait une ligature à un nerf et qu'on l'irrite au-dessous, il y en a encore, tandis qu'il n'y en a pas quand on l'irrite du côté opposé. On obtient les mêmes résultats quand on fait passer l'électricité à travers une partie du tronc nerveux, au-dessous ou au-dessus de la ligature. On peut conclure de là que l'électricité agit comme excitant du système nerveux.

On sait que les muscles d'un animal mort perdent peu à peu la propriété de se contracter, et les nerfs, celle d'exciter les contractions quand ils sont irrités. Valli a reconnu que les parties des nerfs les plus rapprochées du cerveau sont celles qui perdent les premières ces propriétés, quand on les fait traverser par un courant. M. Matteucci a étudié en détail et confirmé ce résultat : ainsi,

quand une partie d'un nerf ne peut plus exciter de contractions, lorsqu'on le fait traverser par un courant, on peut en obtenir immédiatement en faisant passer ce courant entre deux points du nerf plus rapprochés des extrémités du muscle dans lequel il se ramifie.


Fig. 1125.

Quand les nerfs sont traversés par un courant, dans une direction perpendiculaire à leur longueur, il n'y a pas de contraction dans les muscles. Ce fait, remarqué par Galvani, a été mis en évidence par M. Matteucci, de la manière suivante : il prend deux jambes de grenouille munies d'un long cordon nerveux (*fig.* 1125); le nerf de l'une est coupé et interrompu dans un espace *ab* de 2 centimètres de longueur, à travers lequel passe le nerf *n* de l'autre jambe. Une goutte d'eau distillée établit la communication entre les points *a* et *b* et le nerf *n*. On fait communiquer les points *a* et *b* avec les pôles d'une pile; le courant traverse transversalement le nerf *n*, et la jambe à laquelle il appartient n'éprouve pas de contraction, tandis que l'autre s'agite convulsivement.

Influence de la continuité du courant. — Les contractions ne se manifestent qu'au moment où l'on introduit le courant dans les muscles, et au moment où on le supprime; pendant tout le temps qu'il circule avec une intensité constante, il n'y a pas de contraction. Nobili a cherché à expliquer ce résultat, remarqué par Volta, en admettant que le courant modifie tout à coup l'état des nerfs, et que cette modification disparaît avec le courant; il y a contraction au moment où se fait la modification et au moment où elle cesse. Aussi a-t-il observé que lorsqu'on introduit et qu'on supprime le courant graduellement et non brusquement, il ne se manifeste plus de contractions. Quand le courant est fort et persiste pendant longtemps, la modification produite dans les nerfs et les muscles devient permanente, et les contractions ne peuvent plus avoir lieu, comme l'a remarqué Volta, à moins qu'on ne fasse agir une pile plus forte. Cependant les muscles reprennent peu à peu une grande partie de leur irritabilité par le repos. On peut aussi la leur rendre au moyen d'une étincelle électrique.

Alternatives voltaïques. — Quand les muscles ne se contractent plus après le passage prolongé d'un courant, on peut obtenir instantanément de vives contractions, en changeant le sens de ce courant. Volta a pu, au moyen de semblables *alternatives*, produire des contractions sur la grenouille, pendant toute une journée. Ce qui montre que l'inaptitude aux contractions, qui suit le passage continu d'un courant, n'est pas due à une désorganisation qu'il aurait produite dans les muscles et les nerfs, mais simplement à une modification momentanée imprimée au système des molécules organiques.

Influence du sens du courant. — Le sens du courant a une influence remarquable sur le phénomène : il y a contraction au moment de la fermeture du circuit, dans les muscles où le courant marche dans le sens des ramifications

des nerfs, c'est-à-dire dans les parties où il est *direct*, suivant la notation de Nobili ; et les contractions ont lieu au moment où l'on supprime le courant, dans les muscles qu'il parcourt en sens contraire des ramifications, c'est-à-dire dans les parties où il est *inverse*. Cette loi, découverte en 1800 par M. Le Hot, avait été entrevue par Volta, qui avait observé que la décharge de la bouteille de Leyde ne produit de contraction sur des membres de grenouille qu'autant que l'électricité positive entre par le tronc. M. Marianini, qui a fait beaucoup d'expériences sur ce sujet, plaçait les jambes d'une grenouille écorchée, dans un vase plein d'eau salée, et le tronc, qui ne tenait aux jambes que par l'intermédiaire des nerfs cruraux, dans un autre vase (*fig.* 1121). Quand le courant était dirigé du tronc aux membres, il y avait contraction au moment où l'on fermait le circuit ; mais il n'y en avait pas, ou il n'y en avait qu'une très faible, au moment où on l'ouvrait. Le contraire avait lieu quand le courant marchait des membres au tronc. — En 1816, M. Bellingieri reconnut qu'il suffit de faire passer le courant à travers une certaine longueur du tronc nerveux, pour observer ces résultats différents, suivant que l'électricité positive entre par le point le plus éloigné des ramifications, ou par le plus rapproché.



Fig 1126.

M. Matteucci a employé une méthode dans laquelle les deux résultats se voient en même temps : une grenouille préparée à la manière de Galvani est placée à califourchon sur deux vases remplis d'eau (*fig.* 1126), dans lesquels on plonge les pôles de la pile. Quand la grenouille est forte, il y a d'abord contraction dans les deux jambes au moment où l'on établit et où l'on supprime le courant ; mais au bout de quelque temps, la contraction n'a lieu quand on établit le courant, que dans la jambe où il est *direct*, et quand on le supprime, que dans celle où il est *inverse*. Ce résultat se vérifie sur toutes les espèces d'animaux ; il explique comment la grenouille réoscopique indique le sens d'un courant qui parcourt une partie du tronc nerveux qui en sort (1501).

M. Nobili, qui a publié en 1829 une longue série de recherches sur les contractions produites par l'électricité, distingue 5 états de la grenouille [1]. Dans le premier, quand la grenouille est fraîchement préparée, il y a contraction, que le courant soit direct ou inverse, au moment où on l'établit et au moment où on le supprime. Dans le second état, il y a de fortes contractions quand on ferme le courant direct et quand on ouvre le courant inverse ; il n'y en a pas quand on ferme le courant inverse, et il n'y en a que de faibles quand on ouvre le courant direct. Ces dernières n'existent plus dans le troisième état. Dans le quatrième, il n'y a de contractions qu'au moment où l'on

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XLIV, p. 60.

ferme le courant direct. Dans le cinquième, les contractions n'ont plus lieu dans aucun cas, à moins qu'on n'emploie un courant plus énergique.

On doit conclure de ce qui précède que, si les courants agissent comme excitants du système nerveux, leur mode d'action diffère essentiellement de celui des autres stimulants, puisque les effets dépendent du sens du courant. De plus, on remarque que : 1° l'électricité peut agir encore quand les autres stimulants n'ont plus d'efficacité; 2° le changement du sens du courant ranime l'irritabilité; 3° la cessation du courant détermine une contraction très forte; 4° les poisons, comme la morphine, l'acide prussique, qui anéantissent l'irritabilité du nerf pour les excitants ordinaires, la laissent subsister pour l'électricité.

1511. De la contraction lors de la rupture du circuit. — Comment concevoir maintenant la contraction qui a lieu au moment où l'on interrompt le circuit ? Volta l'expliquait par un refoulement du courant en arrière, au moment où le passage lui est fermé. M. Marianini a reconnu que cette hypothèse est inadmissible [1]. En effet, l'aiguille d'un réomètre revient simplement et avec calme à sa position d'équilibre quand on ouvre le circuit; la cuisson que l'on éprouve à une écorchure du doigt, pendant le passage du courant, cesse aussitôt qu'on le supprime; enfin, si, au lieu d'ouvrir le circuit, on enfonce simplement un arc métallique dans les vases qui reçoivent le tronc et les membres de la grenouille, on observe encore une contraction, quoiqu'on ne supprime pas le courant, mais qu'on ne fasse que le détourner subitement de la grenouille. Nobili explique alors la contraction au moment où le courant cesse, par l'accumulation de l'électricité dans les nerfs qu'il parcourt en sens inverse. Quand le circuit s'ouvre, cette électricité reflue dans le sens des ramifications, et produit la contraction, qui n'a lieu, comme nous l'avons vu, que dans les nerfs où le courant est inverse. Cette manière de voir est confirmée par cette circonstance que la contraction, lors de la rupture, est d'autant plus forte que le courant a circulé pendant un plus long temps; quand le circuit n'a été fermé que pendant un temps très court, elle est très faible. Si le temps était infiniment court, il ne devrait donc pas y avoir de contraction. C'est, en effet, ce qui semble avoir lieu : quand on fait l'expérience avec la bouteille de Leyde, il n'y a aucun effet quand le fluide positif entre par les jambes de la grenouille, le courant étant établi et interrompu au même instant.

Peltier explique autrement la contraction au moment de la rupture : les extrémités des membres de la grenouille se *polarisent*, et le courant contraire produit par les matières déposées, agissant seul quand on ouvre le circuit, fait contracter les muscles dans lesquels il est direct, c'est-à-dire ceux dans lesquels le courant de la pile était inverse. L'influence de la durée du passage de ce dernier se conçoit bien dans cette explication; mais il est difficile

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XL, p. 225 et 241.

d'admettre que le courant très faible que produit la polarité secondaire, soit capable d'exciter des contractions, souvent aussi fortes que celles que donne le courant de la pile.

II. Effets produits sur les animaux vivants.

1512. Sensations produites par les faibles courants. — Les courants produisent sur les êtres vivants des *sensations* plus ou moins vives, et des *contractions*. L'expérience la plus ancienne a été publiée par Sulzer dans sa *Théorie générale du plaisir*, en 1767, avant la découverte de Galvani. On place deux disques de zinc et de cuivre, l'un au-dessus, l'autre au-dessous de la langue, puis on rapproche leur bord extérieur jusqu'au contact ; aussitôt on ressent une saveur acide au point de la langue touché par le zinc, et une saveur alcaline au point touché par le cuivre. Si l'expérience se prolonge quelque temps, on peut éprouver des nausées. Volta, qui a fait revivre cette expérience, a trouvé que la saveur varie, suivant la nature des métaux, de l'acide brûlant à l'alcali amer. Ces sensations proviennent, au moins en partie, de la décomposition des humeurs de la langue, par le courant électrique auquel donne naissance le couple voltaïque que forment les deux métaux.

Divers observateurs ont varié, depuis, ces expériences : Hunter ayant engagé une lame de métal sous la langue, et placé une autre lame d'espèce différente entre la lèvre et la gencive de la mâchoire supérieure, aperçut une lueur assez vive, chaque fois qu'il mettait ces lames en contact. Il a obtenu des résultats semblables en appliquant les lames aux deux yeux, ou l'une à un œil, l'autre à la langue. De Humboldt a éprouvé, à la suite de semblables expériences, une faiblesse momentanée de la vue, et une légère inflammation de la conjonctive [1]. Aldini a pu faire apercevoir une lueur assez vive à des aveugles, en mettant les pôles d'une pile en contact avec les lèvres et le bout du nez. Tous ces effets lumineux doivent être attribués à des contractions, et comparés à ceux que l'on produit en comprimant et frottant les paupières.

De Humboldt ayant introduit une lame de zinc dans une narine, et l'ayant mise en contact avec une lame d'argent placée sur la langue, éprouva dans le nez une sensation de froid accompagnée d'un chatouillement donnant envie d'éternuer. Le Dr Monro saignait du nez quand il faisait cette expérience ; l'hémorragie commençait dès qu'il apercevait une lueur.

Volta ayant fait passer le courant d'une pile de 40 couples, d'une oreille à l'autre, entendit un grand bruit qu'il compara à celui que produit une matière visqueuse en ébullition. Ritter entendait un son musical au moment où le courant s'introduisait ; il a publié beaucoup d'autres résultats, mais dont quelques-uns paraissent, *à priori*, peu vraisemblable.

[1] *Expériences sur le galvanisme*, traduction de M. Jadelot (1799).

1513. Commotion voltaïque. — Quand on fait communiquer les pôles d'une pile au moyen d'une partie du corps, on ressent une commotion d'autant plus forte que la pile se compose d'un plus grand nombre de couples. L'étendue des éléments ne peut suppléer au nombre, l'effet dépendant de la tension des électricités : ainsi, les 12 couples en hélice de la Faculté des sciences de Paris (1434) ne donnent qu'une légère secousse. Gay-Lussac ayant voulu éprouver le choc des 600 couples de la batterie à auges de l'Ecole polytechnique, reçut une commotion tellement violente, qu'il s'en ressentit pendant plus de 24 heures, et conserva pendant tout ce temps une grande faiblesse dans les bras. La pile de 2000 couples de l'Institut de Londres est capable de tuer un cheval ou un bœuf. Quand la pile n'est pas très forte, il faut, pour bien recevoir la commotion, mouiller les mains avec de l'eau salée, pour augmenter la conductibilité de l'épiderme, et saisir des cylindres métalliques fixés aux électrodes. Plusieurs personnes peuvent recevoir simultanément la décharge, en se donnant la main ; mais il faut remarquer que toutes ne la ressentent pas également : celles qui sont au milieu de la chaîne peuvent ne rien éprouver, ou n'éprouver qu'une faible secousse.

La commotion se fait sentir au moment où l'on établit la communication, puis on n'éprouve plus qu'un léger frémissement dans les muscles, accompagné d'une irritation sourde particulière. Une nouvelle commotion se produit, au moment où l'on interrompt la communication, comme cela a lieu sur les animaux morts (1510).

1514. Influence du sens du courant. — Nous avons encore à signaler ici l'influence du sens du courant : s'il est *direct*, il y a contraction quand on l'établit, sans impression vive ; et au moment où on le supprime, il n'y a pas de contraction, mais une douleur plus ou moins forte. C'est le contraire lorsque le courant est *inverse*. Pour établir cette loi. M. Marianini prépare une grenouille très vigoureuse, de manière que le tronc ne reste uni aux membres postérieurs que par les deux faisceaux des nerfs cruraux. Les pattes postérieures sont réunies par une feuille de plomb, et soulevées dans la main revêtue d'une substance isolante. La partie antérieure du corps repose sur une lame de verre, et l'une des pattes est entourée d'une petite bande de plomb en communication avec un des pôles d'une pile. Quand on fait passer un courant, de la tête aux jambes, ces dernières se contractent au moment où l'on ferme le circuit. Quand ensuite on l'ouvre, les jambes ne s'agitent pas, mais l'animal pousse un cri prolongé, se soulève, et donne tous les signes d'une vive douleur. Les effets inverses ont lieu quand le courant marche des jambes à la tête. Cette expérience a été répétée plusieurs fois avec des piles ayant, depuis 1 jusqu'à 8 couples. Il ne faut pas que la pile soit trop forte, car, alors, les contractions auraient lieu également quand on fermerait et quand on ouvrirait le circuit.

M. Marianini a aussi observé que, si l'on ferme le circuit avec les bras, on ressent une secousse plus forte au bras dans lequel le courant est direct. Ritter avait déjà reconnu que l'on éprouve un sentiment de lassitude et de

gêne dans le bras où le courant est direct, et dans l'autre bras, une excitation particulière.

Nous citerons encore l'expérience suivante, de M. Matteucci : il découvre sur un lapin, le nerf sciatique des deux cuisses, le sépare bien, l'essuie avec du papier Joseph, et l'appuie sur du taffetas isolant. Il fait ensuite passer le courant d'une pile de dix couples dans une partie du nerf : l'animal pousse des cris et éprouve des contractions dans la cuisse, et dans le dos et les oreilles. Ces phénomènes, qui cessent pendant le passage du courant, se reproduisent au moment où il est interrompu ; ils sont les mêmes, quel que soit le sens du courant [1]. Mais quand l'irritabilité de l'animal est diminuée, l'entrée du courant direct détermine dans les pattes des contractions sans douleur, et sa suppression produit la douleur sans contractions. Le contraire a lieu quand le courant est inverse dans la partie du tronc nerveux qu'il parcourt. Quand on fait passer le courant perpendiculairement au nerf, on n'observe aucune action, comm dans le cas des animaux morts (1510).

1515. Action sur les différentes parties du système nerveux. — Il résulte de la loi qui précède, que le courant produit tantôt des sensations, tantôt des contractions : à l'instant où l'on ferme le circuit, les premières ont lieu quand le courant est inverse, et les secondes, quand il est direct. On peut faire à ce sujet un rapprochement très important ; c'est que les impressions que reçoivent les organes de la sensibilité, de la part des agents extérieurs, se transmettent au cerveau en marchant en sens contraire des ramifications des nerfs, et que les contractions volontaires sont provoquées par une influence qui, partant du cerveau, se transmet dans le sens des ramifications, comme le courant quand il produit la contraction à son entrée. En outre, les physiologistes ont distingué, des fibres nerveuses destinées spécialement aux sensations, et d'autres destinées aux mouvements. Ils ont reconnu aussi que les nerfs qui partent de la moëlle épinière, s'en séparent par deux systèmes de racines, les unes antérieures qui président aux mouvements, et les autres postérieures, qui correspondent à la sensibilité. Il était curieux de chercher comment agit un courant sur ces deux espèces de racines ; c'est ce qu'ont fait MM. Longet et Matteucci, et ils ont reconnu que le courant direct n'excite pas de contractions quand il entre par les racines postérieures, et qu'il en produit quand il entre par les racines antérieures. Les faisceaux antérieurs et postérieurs qui composent la moëlle épinière se comportent comme les racines correspondantes. On peut donc, au moyen de l'électricité, distinguer les nerfs du mouvement de ceux de la sensibilité. Il ne faut pas employer un courant

[1] Les contractions produites dans les parties antérieures du corps, où le nerf sciatique n'envoie pas de ramifications, s'expliquent par la transmission de l'excitation de ce nerf à la moëlle épinière, qui détermine ensuite la contraction dans les muscles où elle envoie des filets nerveux. Si l'on coupe, en effet, la moëlle épinière, les contractions ne s'étendent pas aux muscles situés au-dessus de la section.

trop fort, autrement l'électricité pourrait passer des racines antérieures aux racines postérieures, et réciproquement.

Quand on excite les nerfs des organes des sens, on y développe l'espèce de sensation qui leur est propre : le son dans l'organe de l'ouïe, les saveurs et les odeurs dans les organes du goût et de l'odorat, la lumière dans l'œil (1509). Ce dernier résultat s'observe facilement en touchant avec la main un des pôles d'une pile de 5 à 6 couples, et mettant l'autre pôle en communication avec une partie du visage, mouillée avec de l'eau salée.

Nous avons vu (1509) que les muscles qui ne sont pas sous l'influence de la volonté se contractent par le passage du courant. Les nerfs du système ganglionaire, qui sont ceux qui président à ces contractions, sont donc aussi susceptibles d'être excités par le courant. Mais ils présentent cette particularité, que l'action du courant se produit d'abord lentement, qu'elle continue pendant son passage, et persiste quelque temps après qu'on l'a supprimé. Nous avons vu que, au contraire, ce n'est qu'aux moments où l'on ferme et où l'on ouvre le circuit, que les muscles volontaires se contractent.

1516. Effets dus au passage continu d'un courant. — Si les muscles volontaires ne se contractent pas pendant le passage continu d'un courant, ce dernier a néanmoins une influence évidente sur leurs nerfs, puisque leur irritabilité diminue peu à peu pendant qu'il passe (1510). Le courant continu peut produire d'autres effets : transporter des fluides à travers les tissus organiques, ranimer les actions vitales, rétablir certaines fonctions, modifier les sécrétions, les exhalations... Citons quelques exemples.

Des poulets soumis à l'action continue d'une pile de 50 couples, s'affaiblirent peu à peu ; quand ils furent presque morts, le courant ayant été interrompu, ils battirent aussitôt des ailes. L'autopsie montra que le sang était extravasé dans les muscles, et que les intestins étaient refoulés vers le bassin. Achard, ayant fait passer le courant d'un seul couple, d'une extrémité à l'autre du tube intestinal, éprouva des douleurs dans le bas-ventre, l'énergie de l'estomac fut augmentée et des changements furent produits dans les évacuations alvines. Ces résultats, vérifiés par de Humboldt, lui suggérèrent l'expérience suivante : une linotte était près d'expirer ; il introduisit une lame de zinc dans le bec, une lame d'argent dans le rectum, et établit une communication métallique entre ces deux lames ; l'oiseau ouvrit les yeux, battit des ailes, respira pendant 6 à 8 minutes, et mourut ensuite tranquillement.

Ure, après avoir reproduit sur un cadavre les mouvements de la respiration (1509), pensa que l'on pourrait, au moyen de l'électricité, rappeler à la vie les personnes asphyxiées. Aldini avait déjà fait des essais sur des chiens et autres animaux, noyés, ou asphyxiés au moyen du gaz, et il avait pu les ranimer en faisant passer un courant de la bouche au rectum. MM. Pouillet, Magendie, Andral et Roulin ont fait une série d'expériences analogues : des cochons d'Inde asphyxiés, ne donnant plus signe de vie depuis une demi-heure, furent rappelés

à la vie; le mouvement respiratoire étant rétabli, le cœur se contracta et la circulation reprit son cours.

Le Dr Wilson Philip, en 1816 ayant fait une incision au cou d'un lapin vivant coupa les nerfs de la 8e paire, qui vont à l'estomac. La respiration devint très pénible, l'animal faisait des efforts pour vomir, et au bout de quelques heures, on reconnut, en faisant l'autopsie, que du persil qui remplissait l'estomac n'avait pas été digéré, et que les poumons étaient dans un état de congestion manifeste. Chez un autre lapin qui avait suivi le même traitement, on fit passer un courant à travers les parties inférieures des nerfs coupés : la respiration se fit facilement, les poumons ne furent pas congestionnés, et le persil fut trouvé aussi complètement digéré que chez des lapins qui n'avaient pas été mutilés. Des résultats semblables furent obtenus sur des chiens. La pile était faible et ne donnait pas de commotion pénible [1].

De nombreuses expériences prouvent l'influence des courants pour modifier la nature des fluides de l'économie animale. De Humboldt ayant posé une plaque d'argent sur un vésicatoire qu'il s'était fait appliquer derrière l'épaule, et ayant mis cette plaque en contact avec du zinc, observa une augmentation dans l'écoulement de l'humeur, accompagnée d'une cuisson vive. Cette humeur, au lieu d'être blanche et douce, était tellement âcre quelle laissait sur la peau des traces d'un bleu rougeâtre. M. Matteucci ayant mis entre les pôles d'une pile de 15 couples, deux points du péritoine mis à nu sur les côtés de l'abdomen d'un lapin, recueillit une humeur alcaline au pôle négatif, et acide au pôle positif. Il obtint des résultats analogues en opérant de la même manière sur le foie ou les intestins mis à nu de divers animaux vivants. Il conclut de là qu'il y a analogie entre le mécanisme des sécrétions, et les décompositions électro-chimiques avec transport des éléments.

Enfin, les courants peuvent modifier les liquides organiques : Brandt a vu l'albumine d'un œuf se coaguler au pôle positif; Brugnatelli a reconnu que le sang est coagulé quand il est traversé par un courant. M. I. Petrequin, en appliquant cette dernière propriété, a réussi le premier à guérir, sans opération sanglante, certaines tumeurs anévrismales : il y coagule le sang en faisant passer un courant à travers ce liquide, au moyen d'aiguilles d'acier enfoncées dans la tumeur. On a reconnu depuis qu'il est préférable d'enfoncer seulement l'aiguille positive, en faisant communiquer le pôle négatif avec l'extérieur de la tumeur.

1517. De l'électricité animale. — Il résulte des détails qui précèdent, que les courants électriques, interrompus ou continus, sont capables de produire dans les organes des animaux, des effets analogues à ceux que produit l'influence nerveuse : contractions, sensations, sécrétions, mouvements du cœur et de la respiration ; on peut, au moyen d'un courant, rétablir les fonctions

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XIV, p. 341, et t. XXII, p. 216.

de l'estomac, des intestins, des organes de sécrétion. Les physiologistes ont admis l'existence d'un agent, désigné souvent sous le nom de *fluide nerveux*, et qui transmet, du cerveau, siége de la volonté, aux différents organes, l'excitation nécessaire à l'accomplissement de leurs fonctions. Or, l'électricité agissant précisément de la même manière, on est porté à admettre que le fluide nerveux n'est autre que l'électricité, qui, engendrée dans le cerveau, serait lancée par l'acte de la volonté, à travers le système nerveux, dans la direction où l'effet doit être produit. Cependant, un courant continu circulerait dans le système sanglionnaire, pour produire les phénomènes de la vie organique; comme les mouvements du cœur et des poumons, ceux qui accompagnent la digestion, les transports des fluides à travers les tissus, les sécrétions. Dans certains poissons, nous voyons un organe spécial dans lequel l'électricité, lancée par un lobe particulier du cerveau, peut être accumulée et se manifester extérieurement. La surexcitation du cerveau par différentes causes, comme la peur, la colère, l'enthousiasme, peut donner lieu à une production surabondante d'électricité; alors la rapidité des battements du cœur est modifiée, la respiration surexcitée, et les contractions musculaires peuvent arriver à un degré d'énergie inusité. Un exercice prolongé sous l'influence d'une température élevée, peut aussi augmenter la sécrétion du fluide cérébral; si ensuite on se livre au sommeil, l'organe surexcité continuant à produire beaucoup de fluide, et ce fluide n'étant plus utilisé, il s'accumule dans les organes, et il en résulte de temps à autres des décharges intérieures accompagnées de commotions, quelquefois assez fortes pour être douloureuses, et qu'une foule de personnes ont pu observer pendant les premiers moments du sommeil.

L'identité du fluide nerveux et de l'électricité, tantôt admise, tantôt combattue par les physiciens et les physiologistes, tend à se confirmer à mesure que la science fait des progrès; elle a acquis un degré de vraisemblance de plus, le jour où l'on est parvenu à dériver à l'extérieur une partie de l'électricité du corps des animaux (1505). Mais, dans l'état actuel de la science, on ne peut la considérer que comme une hypothèse très plausible.

1518. Applications à la médecine. — On a cherché à tirer parti des effets variés que l'électricité produit sur les organes, pour guérir diverses maladies. Les premiers essais à cet égard paraissent dus à Nollet. Jallabert parvint à guérir des paralysies; Sans, Bertholon, Sigaud-Lafond..... obtinrent de nombreux succès sur la même maladie. On employait alors la commotion de la bouteille, une série d'étincelles, des aigrettes électriques jaillissant par des pointes, ou enfin on administrait le *bain électrique*, c'est-à-dire qu'on chargeait d'électricité le malade préalablement isolé. D'abord, on opéra sans méthode, à peu près au hasard; aussi des échecs multipliés firent-ils douter de la réalité des succès obtenus. Le charlatanisme s'étant ensuite emparé de cette nouvelle manière de guérir, l'électro-thérapie tomba dans le discrédit. Les découvertes de Galvani et de Volta rappelèrent l'attention sur ce sujet. On put, au moyen de la pile, diriger le courant spécialement à travers les organes malades; on

commença à étudier son mode d'action, et l'on obtint des résultats plus constants. On réussit assez souvent aujourd'hui à rétablir les fonctions vitales dans des membres paralysés, au moyen de commotions réitérées; à guérir des névralgies, des rhumatismes..... Nous avons vu comment on peut ranimer des animaux asphyxiés, et cette application mériterait d'être étudiée de nouveau.

Il y a aujourd'hui deux moyens principaux d'employer le courant de la pile : 1° quand on veut exciter les organes, comme dans les cas de paralysie, on fait passer le courant par intermittences, afin d'obtenir des contractions. Pour fermer et ouvrir alternativement le circuit, on employa d'abord un mouvement d'horlogerie faisant osciller un levier. On obtient aujourd'hui des commotions très rapprochées au moyen d'appareils d'induction que nous décrirons plus tard, et qui permettent d'en modifier à volonté la rapidité et l'intensité. Pour diriger les courants, on termine les réophores par des plaques, quelquefois recouvertes d'une multitude de saillies, ou par des éponges mouillées avec de l'eau salée, ou encore par des brosses ou des pinceaux métalliques que l'on applique sur les régions par lesquelles on veut faire entrer ou sortir le courant. Souvent aussi, on emploie la *galvano-poncture*, c'est-à-dire qu'on enfonce des aiguilles d'acier dans les muscles, de manière à conduire l'électricité en un point voisin du nerf sur lequel on veut agir. On s'est servi avec avantage du courant intermittent, pour rappeler à la vie des personnes qui avaient été soumises trop longtemps à l'action de l'*éther* ou du *chloroforme*. 2° On fait passer le courant d'une manière continue : par exemple, quand on veut diminuer l'irritabilité des nerfs, dans certaines affections nerveuses. M. Nobili a employé ce mode d'électrisation, pour combattre le tétanos. Le courant continu agit encore pour modifier les sécrétions, favoriser les déplacements de fluides, dénaturer les plaies en produisant des décompositions chimiques : c'est ainsi que MM. Becquerel et Breschet ont pu détruire la nature alcaline des humeurs sécrétées par un ulcère rebelle, en le faisant communiquer avec le pôle positif d'une pile.

Chaînes galvaniques. — On a imaginé, pour les usages médicaux, des piles en forme de chaînes qui peuvent s'appliquer sur différentes parties du corps. Les plus efficaces sont celles de M. Pulver-Macher (*fig.* 1127) : chaque couple est formé d'un cylindre aplati en bois *ca*, sur lequel sont enroulés en hélice un fil de zinc et un fil de cuivre engagés dans des sillons creusés dans le bois, de manière que ces fils ne se touchent pas. Le fil de zinc communique avec le fil de cuivre du couple voisin. Ces couples sont articulés les uns aux autres, de manière que la pile présente la flexibilité d'une chaîne. Les couples sont disposés en large comme en *ca*, ou en long comme en AB. Pour employer la chaîne, on la trempe dans du vinaigre plus ou moins étendu d'eau, et on l'applique sur la peau, de manière que la partie malade soit comprise entre ses deux extrémités. La transpiration de la peau suffit, du reste, pour mettre la pile en activité, quand elle n'a pas été trempée dans l'acide. Si l'on veut obtenir des commotions, on emploie le *modificateur électro-physiologique* : cet appareil

consiste en une boîte à manche isolant *m*, dans laquelle un mouvement d'horlogerie fait tourner une roue dont une dent vient à chaque tour rencontrer un petit ressort, de manière à fermer un instant le circuit. On peut faire varier la vitesse, en modifiant plus ou moins la tension du ressort. Quand la chaîne est appliquée sur le corps, on peut obtenir de légères commotions au moyen du *cylindre interrupteur*, E (*fig.* 1127). Un tube de verre, terminé par des viroles métalliques, par lesquelles il est accroché en *e* au milieu de la chaîne, contient un ressort en hélice fixé à l'une des viroles, et qui ferme le circuit quand son extrémité libre, munie d'un disque étoilé, vient toucher l'autre virole; ce qui se produit fréquemment, le ressort oscillant aux moindres mouvements du malade.

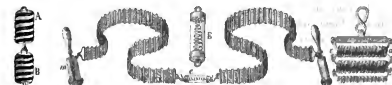


Fig. 1127.

Nous ne devons pas entrer ici dans plus de détails sur la manière d'appliquer l'électricité à la thérapeutique, sur l'efficacité des méthodes adoptées par les divers praticiens, sur les cas où elles peuvent être appliquées sans danger, et sur les précautions à prendre dans chacun de ces cas; ce serait sortir de notre sujet, et nous nous contenterons de renvoyer aux ouvrages spéciaux.

III. Effets de l'électricité sur les végétaux.

1519. Van-Marum, ayant fait passer de fortes décharges à travers des branches de différentes espèces d'euphorbes, reconnut qu'elles avaient perdu la propriété de chasser au dehors, quand on les coupait, le suc laiteux qu'elles contenaient; d'où il conclut que le passage de l'électricité avait détruit dans les vaisseaux la faculté de se contracter.

Giulio, de Turin, a vu les feuilles de différentes espèces de *mimosa* se replier sur elles-mêmes quand il faisait passer à travers les branches, le courant d'une pile de 50 couples. Les feuilles se contractaient lentement et les unes après les autres, pendant le passage du courant, et non au moment où on l'introduisait. Un seul couple ne produit aucun effet, même sur la *mimosa sensitiva*, qui se contracte le plus facilement.

Il résulte d'expériences faites par MM. Becquerel et Dutrochet, que le mouvement circulatoire de la sève dans les cellules du *chara*, est ralenti pendant le passage d'un courant suivant la longueur de la tige, quel qu'en soit le sens. Si le courant est assez fort pour arrêter le mouvement de la sève, le mouve-

ment reprend peu à peu sa première vitesse ; on l'arrête de nouveau en augmentant le nombre des couples de la pile, puis il reprend encore, et ainsi de suite, jusqu'à ce que le courant soit assez fort pour arrêter le mouvement pendant plusieurs heures.

1520. Influence de l'électricité sur la germination et la végétation. — L'électricité paraît influencer la germination des graines. Nollet avait vu des graines humectées et électrisées germer avec rapidité, tandis que d'autres de même espèce placées dans les mêmes conditions, mais non électrisées, ne germaient pas. Ce phénomène a été étudié par Jalabert, Davy, et en dernier lieu par M. Becquerel[1]. Ce dernier physicien plaça une capsule en porcelaine entre deux capsules en platine en relation avec les pôles d'une auge de 30 couples faiblement chargés; les capsules communiquaient entre elles par des mèches de coton mouillé, et contenaient de l'eau de Seine et du coton sur lequel étaient des graines de cresson alénois. La germination se fit également dans la capsule négative et dans la capsule de porcelaine, et fut très lente dans la capsule positive. Le courant ayant été interrompu, la végétation continua dans les deux premières capsules et fut comme suspendue dans la dernière, dont l'eau avait une réaction acide, tandis que celle de la capsule négative était alcaline. Or, on sait que les acides nuisent à la végétation, et que les alcalis en petite quantité la favorisent. — M. Becquerel a encore disposé dans deux soucoupes, des doubles lames zinc et cuivre soudées par une de leurs faces ; dans l'une des soucoupes, le zinc était en dessus, et dans l'autre il était en dessous. Une troisième soucoupe contenait une lame de verre au lieu du couple métallique. Toutes les trois contenaient de l'eau, du coton et des graines de cresson ou de pois ordinaires. Au bout de deux ou trois jours, la végétation était la plus avancée sur le coton qui reposait sur le cuivre. Sur la surface du zinc, les radicules semblaient fuir le métal, se contournaient, et les tiges cessèrent bientôt de croître. On trouva sur la face cuivre une réaction alcaline, et l'on constata sur la face zinc la présence d'un sel de zinc nuisible à la végétation. Les résultats étaient encore plus marqués avec de l'eau contenant une petite quantité d'un sel à base terreuse ou alcaline. Il semble résulter de ces expériences, que les courants agissent sur la germination en décomposant les sels contenus dans l'eau, ou dans la graine : au pôle positif, les éléments acides nuisent à la végétation, tandis que les substances alcalines transportées au pôle négatif, la favorisent.

On a généralement remarqué que la végétation est très active par les temps d'orage, et l'on a voulu attribuer cet effet à l'électricité de l'atmosphère ; mais comme les orages ont lieu quand il fait chaud, et qu'ils sont accompagnés de pluie, on peut attribuer les résultats observés, à la réunion de la chaleur et de l'humidité, c'est-à-dire des deux circonstances les plus favorables au développement des végétaux.

[1] *Archives de botanique*, t. I, p. 395.

§ 2. EFFETS PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DES COURANTS.

I. Effets calorifiques dans les bons conducteurs.

1521. Echauffement des fils métalliques. — La pile de Volta venait à peine d'être découverte, qu'on chercha si la décharge de ses pôles pouvait, comme celle des batteries, faire fondre des fils métalliques. En juin 1801, Thénard et Hachette ayant fait communiquer les électrodes au moyen d'un fil métallique, le virent s'échauffer, rougir, fondre ou se volatiliser, suivant que ce fil était plus fin et plus court. Il est à remarquer que l'incandescence, quand il n'y a pas fusion, est constante pendant le passage du courant; ce qui renverse l'opinion que la fusion produite par la décharge des batteries serait due à une compression brusque qui ferait jaillir la chaleur latente du corps. Fourcroy, Vauquelin et Thénard, ont reconnu que les effets calorifiques qui nous occupent dépendent surtout de l'étendue des couples de la pile : cent couples de petite surface ne produisent aucun effet, tandis que quelques couples à grande surface en produisent de très énergiques. L'action dépend donc principalement de la quantité d'électricité qui passe. Un seul couple peut suffire pour faire rougir un fil assez fin. La *fig.* 1128 représente un couple de Wollaston, disposé pour cette expérience ; le fil *ac* est retenu par deux petites pinces *a* et *c* soudées l'une à la lame de cuivre, l'autre à la lame de zinc. Wollaston a pu même, au moyen d'un couple de 7 centimètres carrés formé avec un dé à coudre, fondre un fil de platine de $0^{mm},001$ de diamètre. C'est à propos de cette expérience qu'il conçut l'idée de la pile qui porte son nom.

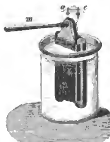


Fig. 1128.

Davy reconnut, de son côté, l'influence de l'étendue des éléments; il vit l'eau entrer immédiatement en ébullition quand il y plongeait un fil de fer de 65^{cm} de longueur et de $0^{mm},3$ de diamètre en communication avec les pôles d'une pile à grands éléments. Il fit fondre des feuilles métalliques de différents métaux, et observa qu'ils brûlent en faisant entendre une crépitation particulière, et en produisant des effets de coloration qui dépendent de leur oxydation par l'air. Le platine seul ne s'oxyde pas et fond en se disséminant en gouttelettes d'un blanc éclatant. L'or forme un oxyde brun, et brûle avec une flamme jaune ; le fer, avec une lumière rouge ; le cuivre la donne verte ; l'argent, blanche au milieu et verte sur les bords ; le zinc, bleue ; le plomb, jaune et violette sur un bord ; l'étain, pourpre. Ces expériences se font facilement au moyen de la disposition suivante : deux colonnes métalliques (*fig.* 1129), dont

une communique avec un des pôles de la pile, soutiennent des fils horizontaux auxquels on suspend les feuilles métalliques *f*, sur lesquelles on veut opérer, et dont on touche l'extrémité libre, avec une boule de platine *n* communiquant avec l'autre pôle de la pile. Le même appareil peut servir à opérer sur des fils de différente nature. Ces fils sont fixés à l'une des colonnes au moyen d'une pince, et à l'autre, au moyen d'une cheville métallique qui peut s'enfoncer à volonté dans deux trous voisins, dont l'un est garni intérieurement d'une substance isolante. Les deux colonnes étant mises en communication avec les pôles de la pile, il suffit d'enfoncer la cheville d'un des fils dans le trou non isolé, pour que ce fil soit traversé par le courant.

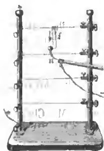


Fig. 1123.

Peltier a reconnu, au moyen de sa *pince thermo-électrique* (1494), que la température du fil est la même dans toute son étendue, excepté aux points de jonction avec les réophores : là, la température est plus basse, à cause de la chaleur enlevée par ces derniers, ou plus élevée, à cause d'un effet particulier qui se produit aux points de jonction, comme nous le verrons ci-dessous (1523).

Avec des batteries à très larges surfaces, on peut obtenir des effets d'une intensité remarquable. M. Children[1] avec une pile de Wollaston de 21 couples, dont chaque zinc présentait 3,60 mètres carrés de surface, a pu fondre des tiges de platine de 7^{cm} de longueur et de $0^{cm},5$ de diamètre. Les piles à charbon permettent aujourd'hui de faire ces expériences avec facilité. Avec 50 couples, on peut faire brûler des aiguilles d'acier à tricoter, et les voir jaillir en étincelles brillantes, quand on en fixe deux aux électrodes de la pile et qu'on rapproche leurs extrémités.

Application à la chirurgie. — Au moyen d'un fil de platine incandescent, on cautérise d'une manière circonscrite les parties profondes ou l'on ne pourrait pas introduire un fer rouge ; on opère, sans hémorragie, l'ablation des tumeurs, des loupes, en les enveloppant à la base, d'une anse en platine incandescent que l'on rétrécit peu à peu. On a pu même amputer la cuisse à des lapins sans aucune effusion de sang. On est surtout frappé de l'innocuité des opérations pratiquées par cette méthode, désignée généralement sous le nom d'*électro-caustique*.

1522. Circonstances d'où dépend l'échauffement. — 1° L'échauffement d'un même fil traversé par un courant, augmente avec la quantité d'électricité qui passe dans un temps donné, par conséquent avec l'étendue des couples de la pile. 2° Plus le fil est fin, court et mauvais conducteur, plus il s'échauffe. On voit facilement pourquoi un fil fin rougit mieux qu'un fil plus

[1] *Bibliothèque universelle de Genève* (Sciences et arts), t. I (1816), p. 109.

gros; c'est qu'il passe plus d'électricité par chaque point du premier. La longueur n'a d'influence qu'en augmentant la résistance que le courant éprouve en parcourant le fil, dont la section est beaucoup plus petite que celle des réophores, ce qui fait qu'une plus grande portion des électricités se recombine alors à travers la pile (1454), de sorte que le courant est plus faible. Mais si l'on a soin de laisser à ce dernier toujours la même intensité, en augmentant le nombre des couples quand le fil fin est plus long, on obtient le même échauffement, comme l'a constaté Peltier, et plus tard M. E. Becquerel. Nous avons vu des lois semblables dans la fusion des fils par la décharge des batteries (1333).

L'influence de la résistance du fil est évidente dans l'expérience suivante faite par M. Children à l'instigation de Wollaston : il réunit les électrodes de sa grande pile, par deux fils de même longueur et de même substance, mais de diamètre différent ; le courant ne passa qu'en faible proportion dans le fil le plus fin, et le plus gros devint seul incandescent ; tandis que le plus fin rougit seul quand les deux fils furent placés l'un à la suite de l'autre.

Pour mettre en évidence l'influence de la conductibilité du fil, M. Children fit passer le courant à travers des fils métalliques de même longueur (21^{cm}) et de même diamètre (0^{mm} 75) soudés deux à deux les uns au bout des autres. L'un des fils fondait ou rougissait, pendant que l'autre ne changeait pas d'aspect. M. de La Rive a répété avec soin ces expériences. Voici quelques-uns des résultats auxquels elles ont conduit :

NE CHANGE PAS D'ASPECT.	ROUGIT A BLANC.	FOND.
Or, argent, zinc ou cuivre	Platine.	»
Argent......	Or.	»
Platine........................	Fer.	»
Zinc ou cuivre	»	Fer.
Argent........................	»	Zinc.

Des deux métaux, c'est celui qui est le meilleur conducteur qui reste obscur. Si l'on forme un fil composé alternativement de platine et d'argent, chaque partie de platine rougit, et l'argent ne change pas d'aspect.

D'aprés ces faits, M. de La Rive admet que l'échauffement des fils est dû à la difficulté qu'éprouve l'électricité à passer d'une molécule à la suivante, aprés la décomposition électrique polaire qui se fait dans chacune d'elles (1442). Nous avons déjà fait mention de cette résistance, dans le cas de la décharge des condensateurs (1332), et nous avons vu que, dans les corps isolants, elle est telle que l'électricité polaire ne peut quitter les molécules (1354). D'aprés

M. de La Rive, ce seraient alors les décharges intermoléculaires qui produiraient la chaleur. A l'appui de cette manière de voir, il remarque que toute solution de continuité, où le courant éprouve une certaine résistance, augmente l'échauffement. Par exemple, lorsque la pile n'est pas assez forte pour faire rougir les fils, l'incandescence peut avoir lieu aux points de jonction, même quand les fils réunis sont identiques, ce qui montre que l'électricité éprouve plus de difficulté à franchir les surfaces de séparation, quand elles ne sont pas intimement unies, qu'à traverser une section égale des fils. Si l'on appuie sur un morceau de charbon conducteur, fixé à l'un des réophores d'une pile de Wollaston de 10 couples seulement, le bout d'un fil de platine de $\frac{1}{4}$ millimètre de diamètre attaché à l'autre électrode, la chaleur est si forte que l'extrémité du fil de platine fond comme le plomb, avec un éclat que l'œil peut à peine supporter, pendant que le reste du fil s'échauffe à peine. Si l'on approche le bout du fil de platine, de la surface du mercure contenu dans une capsule en platine fixée à l'un des réophores, la chaleur est tellement vive au point de contact, que le mercure se volatilise avec un bruit assez fort, accompagné d'une vive lumière, et en produisant un petit nuage blanchâtre (*fig.* 1130). Dans cette expérience, comme dans la précédente, l'échauffement est augmenté par cette circonstance que l'électricité doit se resserrer, pour passer par le petit nombre de points en contact avec le charbon ou le mercure.


Fig. 1130.

C'est à cause de la résistance qu'opposent les solutions de continuité des conducteurs, que l'on peut dériver dans un circuit extérieur, une partie des électricités dégagées dans les couples thermo-électriques (1488).

1523. ÉCHAUFFEMENT DES SOUDURES, SUIVANT LE SENS DU COURANT. — Peltier a étudié les changements de température aux points de jonction des fils traversés par un courant, au moyen de sa pince thermo-électrique (*fig.* 1131), qu'il applique sur le point dont il veut reconnaître l'échauffement, en ayant soin d'interposer du papier très mince, pour empêcher l'électricité de passer, du fil dans la pince [1]. La *fig.* 1132 représente l'ensemble de l'appareil. Le fil *mn* est fixé à deux supports métalliques communiquant par leur pied avec les pôles d'une pile P, dont le courant passe aussi par un réomètre R', qui en indique l'intensité magnétique. La pince *ab* est portée par une règle munie d'une crémaillère qui sert à la faire glisser dans une rainure, quand on fait tourner le pignon denté *r*. On peut ainsi transporter en différents points du fil *mn*, la pince *ab*, dont le réomètre est en R.

Peltier a reconnu d'abord que le sens du courant a une influence marquée sur l'échauffement des soudures. Ainsi, quand le courant passe d'un fil de cuivre dans un fil de fer, zinc plomb ou étain, la température au point de

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LVI, p. 371.

jonction est moins élevée que lorsqu'il marche en sens contraire. Par exemple, un courant qui donne une température indiquée par une déviation de 20° du réomètre R, quand il va du zinc au cuivre, et de 30° quand il va du fer au zinc, ne donne plus que 14° et 13° quand il marche en sens inverse. Si l'on met un fil de zinc entre deux fils de cuivre, la soudure par laquelle le courant entre dans le zinc s'échauffe moins que l'autre.

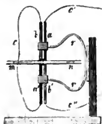


Fig. 1131.

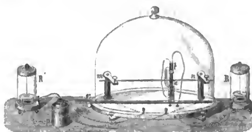


Fig. 1132.

1521. Froid produit par un courant. — En faisant ces expériences, Peltier a découvert le fait très remarquable d'un abaissement de température produit par le passage d'un courant. Ce résultat ne se présente que pour les métaux à structure cristalline, comme le bismuth et l'antimoine. Voici comment on le constate : une lame de bismuth est soudée bout à bout entre deux lames de cuivre; ce systéme étant traversé par un faible courant donnant 20° au réomètre R′ (*fig.* 1132), l'une des soudures s'échauffe, et l'autre *se refroidit*. Les résultats sont indiqués en *cbc′* dans la *fig.* 1133. Les nombres +20°, —10°, écrits près des soudures, sont les déviations du réomètre de la pince thermo-électrique. Les résultats sont inverses quand le bismuth est remplacé par de l'antimoine; ils sont indiqués en CAC′. Quand le courant est trop fort, les deux soudures s'échauffent; mais celle qui se refroidissait s'échauffe toujours moins que l'autre. Enfin, si l'on soude la lame d'antimoine à la lame de bismuth, la soudure se refroidit de — 45°, quand le courant va du bismuth β à l'antimoine α; elle s'échauffe de 37°, quand le courant marche en sens opposé.

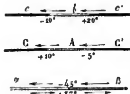


Fig. 1133.

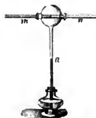


Fig. 1134.

Il est à remarquer que la pince thermo-électrique, enlevant ou cédant de la chaleur aux soudures, les valeurs numériques citées ne sont pas d'une

exactitude parfaite. Peltier a alors évalué les températures des soudures au moyen d'un thermomètre à air (*fig.* 1134), dont la lame mixte *mn* traversait le réservoir, de manière que la soudure fût au centre. Les mouvements du niveau *a* de la colonne liquide faisaient connaître si la soudure s'échauffait ou se refroidissait pendant le passage du courant. — Enfin, pour rendre le résultat plus frappant, M. Lenz a imaginé de creuser une petite cavité sur la soudure qui réunissait deux petits barreaux de bismuth et d'antimoine portés à une température voisine de 0°; ayant mis une goutte d'eau dans la cavité, il la vit se congeler pendant le passage d'un faible courant, du bismuth à l'antimoine.

M. E. Becquerel, qui a répété et varié les expériences de Peltier, a observé un très faible refroidissement avec le fer, quand un courant à peine sensible passait d'un fil de cuivre ou de platine dans un fil de fer.

1525. Loi de l'échauffement des soudures. — Peltier ayant trouvé que la température des soudures dépend du sens du courant, M. Quintus Icilius et M. Frankenheim ont cherché et trouvé la loi de ce phénomène [1]. La méthode qu'a suivie le premier donne des résultats indépendants de l'échauffement des fils hors des points de jonction [1]. Deux bandes d'un même métal sont soudées aux extrémités d'une bande d'un autre métal; on les fait traverser par le courant d'une pile, et les deux soudures s'échauffent inégalement; si donc on supprime le courant et qu'on mette les extrémités de la série des trois bandes en rapport avec un réomètre, on obtient un courant thermo-électrique, dont le sens et l'intensité font connaître laquelle des deux soudures est la plus chaude, et quelle est la différence de leurs températures. Pour obtenir des résultats plus prononcés, M. Quintus Icilius, au lieu d'employer trois lames seulement, a opéré sur une pile thermo-électrique de 32 couples bismuth et antimoine. Le courant d'un couple de Bunsen passait à travers cette série, puis ce courant était supprimé, et les extrémités de la série thermo-électrique étaient mises rapidement en rapport avec le réomètre, qui faisait connaître l'intensité du courant thermo-électrique développé par l'inégal échauffement des soudures alternatives. Mais l'équilibre de température tendant à s'établir, ce dernier courant diminuait rapidement, ce qui en rendait l'évaluation difficile. On tourne la difficulté en laissant osciller l'aiguille, et observant six positions extrêmes successives, d'où l'on conclut par le calcul, à l'aide de méthodes données par M. Wilhelm Weber, l'intensité du courant constant qui aurait donné deux positions extrêmes successives.

On a trouvé ainsi, très sensiblement, que *la différence entre les élévations de température des soudures paires et impaires est proportionnelle à l'intensité du courant voltaïque qui les a traversées*, l'intensité du courant étant mesurée par un réomètre placé dans le circuit voltaïque. Il faut remarquer que ce courant était un peu modifié par le courant thermo-électrique qui se développait par l'inégal échauffement des soudures.

[1] *Ann. de Poggendorff*, t. 89, et *Ann. de ch. et de ph.*, , 3e série, t. XXXIX, p. 249.

Il nous reste à trouver quelles sont les propriétés physiques des deux métaux associés, qui déterminent la soudure à s'échauffer plus ou moins, suivant le sens du courant. Peltier avait cru que l'échauffement était le plus faible quand le courant passait du métal le meilleur conducteur dans l'autre métal ; mais M. E. Becquerel a trouvé qu'il n'en est pas ainsi, et il énonce la loi suivante :

Il y a une relation entre les résultats et le sens du courant thermo-électrique qu'on obtiendrait en chauffant faiblement la soudure : si le sens de ce courant est le même que celui du courant voltaïque qui traverse la soudure, l'échauffement est le moins fort; il peut même être remplacé par un refroidissement [1]. Par exemple, si l'on chauffe la soudure de deux barreaux de bismuth et d'antimoine, on a un courant thermo-électrique qui va du bismuth à l'antimoine à travers la soudure (1484); et si l'on fait passer à travers ces barreaux un faible courant allant aussi du bismuth à l'antimoine, la soudure se refroidit. M. Matteucci a reconnu que si l'on chauffe le point de jonction de deux tiges prises dans un cristal cubique de bismuth, l'une perpendiculairement au plan du clivage principal, l'autre parallèlement, on obtient un courant thermo-électrique allant de la première à la seconde par le point de jonction; si l'on fait passer un courant voltaïque dans le même sens, il y a refroidissement au contact.

1526. Lois de l'échauffement des fils homogènes. — Nous avons vu (1522) que l'échauffement des fils métalliques, dépend : 1° de la conductibilité électrique et des dimensions de ces fils; 2° de l'intensité du courant. Les premières recherches destinées à comparer l'élévation de température à l'intensité du courant ont été faites par M. A. de La Rive [2]. Il mesurait l'échauffement, qui n'allait pas jusqu'à l'incandescence, soit au moyen d'un thermomètre à air dont le fil traversait le réservoir, comme dans la *fig.* 1124, soit au moyen d'une espèce de pyromètre vertical dont le fil laissait descendre, en se dilatant, une aiguille parcourant les divisions d'un cadran, soit au moyen d'un thermomètre de Breguet (II, 843), dont le courant traversait l'hélice métallique, qui remplaçait le fil à échauffer, et dont l'aiguille horizontale portait en son milieu une petite tige verticale plongeant dans une cavité pleine de mercure, par laquelle l'hélice communiquait avec un des pôles de la pile. Pour faire varier l'intensité du courant, M. de La Rive le faisait passer à travers une colonne d'acide nitrique concentré, renfermée dans une auge en verre, et dont il augmentait à volonté la résistance, au moyen de diaphragmes en platine. L'intensité du courant était donnée par un réomètre placé dans le circuit. Voici quelques-uns des résultats obtenus :

Nombre de diaphragmes.	1	2	3	4	5	6
Réomètre............	85°	84	83	75	40	37
Elévation de température.	312°	170	115	12	0	0

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XX, p. 56.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XL, p. 371.

En plaçant un voltamétre (1438), dans le circuit, M. A. de La Rive a trouvé que le temps pendant lequel il obtenait un certain volume de gaz, était de 5ˢ et de 25ˢ, et les élévations de température de 38° et 3°, quand il n'y avait pas de diaphragme et quand il y en avait un. On voit donc que l'élévation de température diminue dans un rapport bien plus grand que l'intensité du courant, soit qu'on évalue cette intensité par la déviation du réométre, soit par la quantité d'eau que peut décomposer le courant pendant un temps donné ; mais la loi de cette diminution restait à trouver.

Peltier a aussi cherché les lois de l'échauffement des fils ; mais comme il mesurait leur température au moyen de sa pince thermo-électrique, et que cet instrument enlevait au point touché une quantité notable de chaleur, il n'a pas trouvé les lois véritables. Ces lois ont été trouvées par M. Joule [1], puis confirmées par MM. Lenz, E. Becquerel et Botto en voici d'abord l'énoncé :

Lois de Joule. — *Lorsqu'un courant traverse un fil métallique homogène*, LA QUANTITÉ DE CHALEUR *dégagée dans l'unité de temps est proportionnelle* : 1° *à la résistance que ce fil oppose au passage de l'électricité*, 2° *au carré de l'intensité du courant* ; cette intensité étant mesurée par la quantité d'eau que peut décomposer le courant pendant l'unité de temps. La quantité de chaleur q dégagée pendant l'unité de temps, est donc donnée par la formule

$$q = kri^2$$

dans laquelle r est la résistance, i l'intensité du courant, et c une constante,

M. Joule faisait passer le courant dans un fil de cuivre qui traversait un tube de verre, puis s'enroulait en hélice autour de ce tube, plongé lui-même dans l'eau d'un petit calorimètre. L'imparfaite conductibilité du liquide faisait que le courant ne pouvait sauter d'une spire à l'autre. La quantité de chaleur dégagée dans un temps donné, était déduite de l'élévation de température de l'eau. La quantité d'électricité qui avait traversé le fil pendant le même temps, était évaluée, en prenant pour unité *la quantité d'électricité capable de décomposer, en une heure, 100 grains d'eau.* Le courant constant capable de fournir cette quantité, déviait le réométre de 33°,5 ; de sorte que la déviation permettait de calculer, en fonction de cette unité, la quantité d'électricité passée en un temps donné. C'est ainsi qu'ont été déterminés les nombres inscrits dans la seconde ligne du tableau qui suit :

Déviation du réomètre	16°	31,5	55	57,7	54,5
Quantités d'électricité	0,43	0,92	2,35	2,61	2,73
Rapports entre les carrés de ces quantités		2,9	18,8	23,2	25,4
Échauffement de l'eau en 30 minutes		3°	19	23	25

Si l'on compare entre eux les résultats consignés dans les deux dernières lignes, on reconnaît sans peine l'exactitude de la seconde loi,

[1] *Archives de l'électricité* de M. A. de La Rive, t. II, p. 54, et V, 353.

Pour vérifier la première loi, M. Joule faisait passer le courant, simultanément dans les deux fils qu'il voulait comparer; ces fils, ayant la même longueur, plongeaient dans des calorimètres identiques. Il a trouvé ainsi, que le rapport entre les élévations de température des calorimètres était égal au rapport des résistances. Les principales expériences ont été faites avec deux fils de cuivre de différent diamètre, un fil de cuivre et un fil de fer, un fil de cuivre et une spirale de mercure introduite dans un tube capillaire contourné.

M. Lenz plongeait le fil dans de l'alcool, qui est encore moins bon conducteur que l'eau. Il mesurait le temps employé à échauffer ce liquide de 1°. La force du courant était évaluée au moyen d'un réomètre; il la faisait varier à volonté, en introduisant dans le circuit, des longueurs de fil de platine plus ou moins grande. La première loi résulte de ce que le produit de la résistance de chaque fil, par le temps employé à chauffer l'alcool, de 1°, s'est trouvé le même

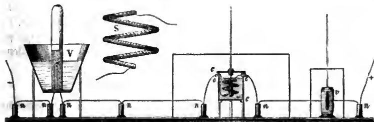


Fig. 1135.

pour le même courant. Les temps se sont aussi trouvés, pour un même fil et divers courants, en raison inverse des carrés des intensités de ces derniers; d'où l'on conclut la 2e loi. Ces expériences ont été faites sur divers fils d'argentan, et sur des fils de platine, de fer et de cuivre.

La *fig.* 1135 représente l'appareil employé par M. E. Becquerel[1]. Le calorimètre *cc* est formé d'un vase cubique en cuivre mince, de $2^{cm},5$ de côté, dans lequel plonge un petit thermomètre. Le fil métallique entre dans ce calorimètre, par des tubes de verre o, *o'*; il est enroulé autour d'une hélice en verre, représentée à part en S. La quantité d'électricité écoulée dans un temps donné était évaluée au moyen du nombre de centimètres cubes de gaz oxygène et hydrogène recueillis pendant le même temps dans un voltamètre V, et recueillis dans une même éprouvette graduée. Un thermomètre plongé dans un vase de cuivre rempli d'eau *v* donne la température de l'air. Le vase *v*, ainsi que le calorimètre, est entouré d'une boîte en carton. Les tubes à mercure *n*, servent à établir les communications.

Pour déterminer les quantités de chaleur fournies au calorimètre pendant un

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. IX, p. 40.

temps donné, M. E. Becquerel attendait que la perte de chaleur à l'extérieur fût égale à chaque instant à la chaleur reçue, c'est-à-dire que la température du calorimètre fût stationnaire. Il calculait alors la chaleur perdue, par la méthode employée par Delaroche et Bérard pour mesurer les chaleurs spécifiques des gaz (II, 903), le calorimètre *cc* ne différant de celui de Delaroche et Bérard qu'en ce que le serpentin était remplacé par un fil métallique contourné.

Indépendamment des lois énoncées dans ce n°, M. E. Becquerel a aussi vérifié le résultat trouvé par Peltier (1522), que l'*échauffement est le même dans tous les points d'un fil cylindrique, quelle que soit sa longueur, pourvu que le courant qui le traverse ait toujours la même intensité*. Il a enfin trouvé que l'*élévation de température est, toutes choses égales d'ailleurs, en raison inverse de la 4e puissance du diamètre du fil*. On voit que ces quatre lois sont précisément celles qui ont été trouvées par M. Riess pour l'échauffement produit par la décharge des batteries. Il faut remarquer cependant que l'effet de celles-ci ne dépend pas seulement de la quantité d'électricité qui traverse le fil, mais aussi de la surface armée de la batterie qui contient cette électricité (1333).

Remarquons encore que la différence d'échauffement de deux soudures étant proportionnelle à l'intensité du courant (1525), tandis que les fils s'échauffent proportionnellement au carré de cette intensité, les variations particulières de température des soudures seront d'autant moins sensibles, que le courant sera plus intense ; c'est pourquoi il faut employer de faibles courants, pour observer le froid qui se produit à certaines soudures.

Nous ajouterons enfin que M. Clausius, en partant des calculs de M. Kirchhoff, est parvenu à rattacher, au moyen de l'analyse mathématique, les lois de Joule aux principes de la théorie mécanique de la chaleur; car il a trouvé pour l'expression de la chaleur dégagée C par le passage d'un courant d'intensité I dans un fil de résistance r, la formule $C = ArI^2$, dans laquelle A représente l'inverse de l'équivalent mécanique de la chaleur (1075) [1].

1527. Influence du milieu sur l'échauffement des fils. — Quand un fil, parcouru par un courant capable de le faire rougir, est plongé dans l'eau, il cesse d'être incandescent. Il est naturel d'expliquer ce résultat par le refroidissement que produit le contact de l'eau ; cependant il y a une autre cause : c'est que le refroidissement dimiuue la résistance du fil, résistance que la chaleur augmente au contraire dans une grande proportion, comme nous le verrons plus loin, et nous savons que l'échauffement diminue en même temps que la résistance (1522). D'un autre côté, l'intensité du courant augmente quand la résistance diminue et qu'on ne change rien au reste du circuit. Un fil plongé dans un milieu refroidissant prendra donc une température qui dépendra à la fois de ces deux causes, qui agissent en sens inverse. Davy a fait à ce sujet l'expérience curieuse qui suit : pendant qu'un fil est porté au rouge cerise par le passage d'un courant, on en refroidit la partie moyenne, au

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XLII, p. 122.

moyen d'un courant d'air, en la plongeant dans l'eau, ou en la touchant avec un morceau de glace ; on voit aussitôt le reste du fil devenir rouge blanc et même fondre : c'est que le courant est devenu plus intense, parce que la résistance de la partie refroidie a diminué. Si, au contraire, on fait rougir à blanc le milieu du fil au moyen d'une flamme, les parties extrêmes deviennent obscures !

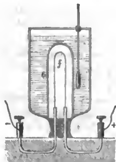


Fig. 1136.

L'expérience suivante, de M. Romney-Robinson, montre bien l'opposition entre les résultats produits par l'augmentation d'intensité du courant et par l'accroissement de résistance du fil par la chaleur : un fil de platine *f* (*fig.* 1136) fut recouvert d'une éprouvette *e* pleine d'air et entourée d'eau. On le fit traverser pendant 12 minutes par un courant ; ce fil devint rouge blanc, et l'eau s'échauffa de 3°,05, L'appareil étant refroidi, on fit passer une partie de l'eau dans l'éprouvette ; alors, sous l'influence du courant, l'eau s'échauffa dans le même temps, de 46°,22 ; mais le courant avait doublé d'intensité, à cause de la moindre résistance du fil *f*, qui resta obscur. — Dans une autre expérience, le courant fut ramené à son intensité primitive, par l'introduction dans le circuit, d'un fil métallique de longueur convenable ; l'eau ne s'échauffa plus que de 1°,65, parce que la résistance du fil refroidi était très faible. Cette expérience montre aussi que la loi de l'échauffement relative à la résistance du fil, doit s'appliquer à la résistance qu'il présente pendant qu'il est échauffé par le courant, et non à celle qu'il possédait avant l'expérience.

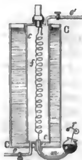


Fig. 1137.

Influence des gaz. — Nous avons vu (II,823) qu'un fil métallique rendu incandescent par un courant, perd immédiatement son incandescence quand on le plonge dans du gaz hydrogène. M. Poggendorff a attribué ce phénomène, comme l'avait déjà soupçonné M. Grove, au refroidissement du fil par le contact du gaz, qui possède un plus grand pouvoir refroidissant que l'air (II,823) ; le fil refroidi devient meilleur conducteur, et le courant, quoique plus intense, ne peut plus le faire rougir.

Viard [1] a démontré l'exactitude de cette explication, en faisant voir que la quantité de chaleur dégagée est la même avec divers gaz, quand on fait en sorte que la résistance du fil ne varie pas. Le fil, *f* (*fig.* 1137), plié en hélice, traverse un tube de cuivre *cc* que l'on remplit d'hydrogène par les tubes *o*, *o'* ; son extrémité supérieure est soudée à un bouchon isolé *l*, l'autre plonge dans un tube recourbé plein de mercure *m*, de façon qu'en la tirant en *r*, on peut

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XLIII, p. 304.

diminuer la longueur de la partie *f* qui se trouve dans le tube *cc*. Le tout est plongé dans un calorimètre CC. Le courant se divise en deux parties : l'une traverse le mercure *m* et le fil à échauffer *f*, et circule ensuite dans l'un des fils d'un réomètre différentiel (1441), dont l'autre partie du courant parcourt en sens contraire le second fil ; on fait en sorte, en donnant plus ou moins de longueur à cette seconde partie du circuit, que l'aiguille du réomètre reste au zéro. Dans une autre expérience, on remplace l'hydrogène par un gaz différent ; la résistance du fil, moins refroidi, est plus grande, et l'aiguille du réomètre obéit à l'action prépondérante de la seconde partie du circuit. Alors, en tirant en *r* le fil à échauffer, on diminue la longueur de la partie *f*, et la résistance devient moindre. Quand on a ramené, par ce moyen, l'aiguille du réomètre au zéro, la résistance est la même que lorsque le fil était entouré d'hydrogène. En opérant ainsi, Viard a reconnu que l'échauffement du calorimètre est le même pendant le même temps, quel que soit le gaz introduit dans le tube de cuivre.

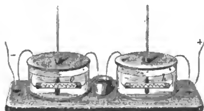


Fig. 1138.

M. Grove a cherché à comparer les effets produits par divers gaz[1]. Pour cela, il a rempli, des gaz à comparer, deux tubes de verre *o* et *h* (*fig.* 1138), de 38mm de longueur, dans lesquels passaient des fils égaux en platine tournés en hélice, de 0mm,3 de diamètre, et de 94mm de longueur. Ces tubes étaient plongés dans des calorimètres séparés, contenant chacun 93 grammes d'eau. Un même courant, fourni par 8 couples de Grove, passait à travers les fils. Quand les gaz étaient l'oxygène *o* et l'hydrogène *h*, le fil plongé dans le premier gaz devenait rouge blanc, tandis que l'autre restait obscur. De plus, la température s'élevait, en 5 minutes, de 11°,7 dans le calorimètre contenant le tube à oxygène, et de 5°,6 seulement dans l'autre ; la température initiale était de 15°,5. Cette différence provenait de ce que le fil entouré d'hydrogène se refroidissant plus que l'autre, présentait moins de résistance au courant et s'échauffait moins. Si l'on remplaçait l'oxygène par d'autres gaz, on trouvait des différences analogues. Le tableau suivant fait connaître les températures du calorimètre qui contenait le tube *o* rempli successivement de différents gaz, quand celui qui renfermait le tube à hydrogène *h* s'échauffait de 5°,5. Les nombres de la troisième ligne représentent les quantités de gaz dégagées par minute dans un voltamètre introduit dans le circuit, quand le courant traversait seulement le tube *o* rempli successivement des différents gaz.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXIX, p. 497.

Acide sulfhydrique,	*gaz oléfiant,*	*acide carbonique,*	*oxyde de carbone,*	*oxygène.*	*azote.*
6°	9°,2	11°	11°	11°,7	12°.
«	126	118.8	118,8	117	115.

Quand le tube *o* était rempli d'hydrogène, le volume de gaz recueilli en une minute dans le voltamètre, était représenté par 138,6.

On voit que les gaz qui refroidissent le plus le fil de platine sont aussi ceux avec lesquels le courant présente la plus grande intensité. La vapeur d'éther agit à peu près comme l'hydrogène. Dans le vide, le refroidissement est moindre que dans les gaz; aussi un fil de platine peut-il rougir sur une plus grande longueur dans le vide que dans l'air.

Application. — M. Becquerel a pu produire des températures très élevées, pour obtenir des fusions, en évitant le refroidissement de fils de platine parcourus par un courant[1]. Ces fils sont enroulés en hélice conique dont les spires, voisines mais ne se touchant pas, se préservent mutuellement du refroidissement. De petits creusets en charbon, platine, porcelaine..., placés dans l'hélice, reçoivent des substances à fondre. On augmente l'effet, en enveloppant le creuset d'une flamme d'alcool, ou en l'entourant d'une feuille de platine poli qui réfléchit la chaleur. L'appareil est recouvert d'une cloche, de manière à pouvoir opérer dans le vide et dans différents gaz.

1528. Échauffement des liquides. — Les liquides s'échauffent, comme les fils métalliques, pendant le passage du courant; mais le phénomène se complique par les variations de température dues aux actions chimiques produites par l'électricité, et par les effets de la résistance qu'elle éprouve en passant, des électrodes métalliques dans les liquides, ou réciproquement. L'influence des actions chimiques est bien évidente dans l'expérience suivante : Davy fixa aux électrodes d'une pile de 100 couples, deux vases coniques en or réunis par une mèche mouillée en amiante : l'un était rempli d'eau pure, l'autre d'eau contenant une goutte d'une dissolution de sulfate de potasse. Cette dernière entra en ébullition au bout de 1 ou 2 minutes. Une goutte d'une dissolution d'azotate d'ammoniaque détermina une telle élévation de température, que l'eau disparut en vapeur en 3 ou 4 minutes, avec un grand bruit. M. de La Rive[2] prouve l'influence de la résistance au passage, en divisant la colonne liquide par des cloisons membraneuses; elle s'échauffe alors beaucoup plus rapidement. Des cloisons métalliques ne conviendraient pas, parce que l'eau décomposée donnerait sur chacune d'elles un dégagement de gaz accompagné d'une absorption de chaleur. Si le courant passe d'un vase à un antre par une mèche de coton mouillée, la mèche s'échauffe, tandis qu'un tube en siphon rempli d'eau, mis à sa place, ne s'échauffe pas sensiblement. — Une tige de plante grasse un peu aqueuse, formée de cellules remplies de liquide, convient

[1] *Traité d'électricité et de magnétisme,* par M. Becquerel père et fils, t. I. p. 345.

[2] *Annales de chimie et de physique,* 2e série, t. XL, p. 378.

très bien pour ces sortes d'expériences : au bout de peu de temps, on voit le liquide entrer en ébullition près des électrodes. Citons encore le résultat suivant : M. Œrsted ayant fait passer un courant à travers une colonne d'eau, trouva la température de 20°,5 près du pôle négatif, de 18° près du pôle positif, et de 23° à égale distance de ces pôles. Le refroidissement produit par le dégagement aux pôles, des gaz hydrogène et oxygène, explique ces résultats.

Expériences de M. E. Becquerel.— Malgré toutes ces complications, M. E. Becquerel est parvenu à constater que les liquides s'échauffent par les courants, *suivant les mêmes lois que les fils métalliques* (1526). L'appareil dont il s'est servi dans ces nouvelles expériences est à peu près le même que celui de la *fig.* 1135 ; seulement le calorimètre est remplacé par un vase en platine assez mince (*fig.* 1139) pouvant contenir 25 grammes d'eau distillée. Le courant entre dans l'eau par le fil *f* et par les deux lames métalliques *l*, *l'* ; il en sort par le fil *f' f'* qui entoure le vase extérieurement. Ce vase sert ainsi d'électrode négatif, et les gaz qui se dégagent à sa surface traversent le liquide et en mélangent toutes les parties. Du reste, les expériences étaient conduites comme pour les fils métalliques. M. E. Becquerel a d'abord opéré sur différentes dissolutions salines, en prenant pour *l*, *l'* des lames formées avec le métal qui entrait dans la base du sel. Alors, si ce métal se déposait sur le vase, les lames *l*, *l'* étaient attaquées par l'acide, pour former une quantité de sel remplaçant celui qui avait été décomposé ; il n'y avait pas de dégagement de gaz, et les effets calorifiques se compensaient aux deux pôles, les effets chimiques qui s'y produisaient étant opposés. Aussi a-t-on retrouvé facilement, dans ce cas, la loi de la proportionnalité de la quantité de chaleur au carré de l'intensité du courant. — La loi relative à la conductibilité du liquide ne se vérifie pas aussi exactement. Ainsi, pour des dissolutions de sulfate de cuivre et de sulfate de zinc, la loi donnerait, pour les quantités de chaleur fournies par un courant capable de dégager 1^{cc} de gaz, des nombres entre eux comme 0,26 et 0,32. Or, l'expérience a donné 0,21 et 0,36. M. E. Becquerel attribue les différences à l'échauffement que produit la résistance qu'éprouve l'électricité à passer du métal dans le liquide, et *vice versâ*.

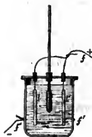


Fig. 1139.

Des expériences avec dégagement de gaz, faites sur de l'eau rendue conductrice par des acides, des bases ou divers sels, ont montré que les lois s'appliquent encore dans ce cas, pourvu qu'on ait soin d'ajouter à la quantité de chaleur reçue par le calorimètre, celle que produirait la combinaison des volumes d'oxygène et d'hydrogène dégagés (1062). Ces volumes sont les mêmes que dans le voltamètre V (*fig.* 1135), comme nous le verrons bientôt. Si les expériences pouvaient se faire avec une grande exactitude, on pourrait même calculer, en partant des lois de l'échauffement, la quantité de chaleur dégagée dans la combustion de l'hydrogène.

Une expérience ancienne de M. de La Rive démontre d'une manière évidente l'influence de la conductibilité d'un liquide sur son échauffement : il mit les unes à la suite des autres des capsules remplies de divers liquides communiquant entre eux par des arcs en platine, et fit passer un courant à travers le système; quel que fût l'ordre des capsules, celles qui renfermaient les liquides les plus résistants s'échauffèrent plus que les autres.

1529. Chaleur produite dans les couples, et origine de la chaleur chimique. — L'action chimique qui a lieu dans le couple voltaïque est accompagnée d'un dégagement de chaleur, en même temps que d'électricité. Quand il n'y a pas de circuit extérieur, cette électricité se recombine tout entière à travers la pile, en formant des courants qui échauffent le liquide, à cause de la résistance qu'ils éprouvent à s'y déplacer. Davy, Berzelius, Ampère, penchèrent à attribuer à cette cause, toute la chaleur des actions chimiques; mais c'est M. Joule qui a le premier nettement formulé cette idée [1]. Il a d'abord reconnu, en observant l'échauffement d'un couple de Smée sans circuit extérieur, et en tenant compte des capacités calorifiques du vase et des diverses substances qu'il contenait, que *la quantité de chaleur dégagée dans un temps donné est proportionnelle à la résistance de conductibilité du couple, multipliée par le carré de l'intensité du courant électrique.* Ce sont les mêmes lois que pour l'échauffement des fils ; ces lois s'appliquent donc à une partie quelconque du circuit, y compris la pile, et par conséquent au circuit entier. M. Joule a encore trouvé que *la chaleur totale développée dans le circuit, est proportionnelle au nombre d'équivalents d'eau ou de zinc employés pour produire le courant.* Il a ensuite cherché les rapports entre les affinités pour l'oxygène de différents corps, *zinc, fer, potassium, hydrogène*, en prenant pour mesure de cette affinité l'intensité magnétique du courant produit par l'oxydation de ces substances. Il a mesuré ensuite directement, par des procédés calorimétriques, les quantités de chaleur dégagées par la combustion des équivalents de ces corps, et a trouvé qu'elles sont proportionnelles à leur affinité pour l'oxygène ; et comme les quantités de chaleur trouvées ainsi, diffèrent peu de celles qu'il a obtenues en cherchant l'échauffement produit dans un fil de résistance connue, par le courant dû à la dissolution d'un poids donné de zinc ou d'une autre substance, il a conclu que la chaleur dégagée dans les combinaisons chimiques, *sans électricité transmise*, a pour origine la résistance à la conductibilité électrique. Cette manière de voir a été confirmée, depuis, par des expériences plus directes ; en montrant, par exemple, que l'échauffement du couple diminue quand on détourne dans un circuit extérieur une partie de l'électricité qu'il produit, et que la chaleur qui lui manque se retrouve alors dans ce circuit.

La quantité totale de chaleur du circuit est constante. — Dès 1843, M. de La Rive avait annoncé que la somme des quantités de chaleur dégagées

[1] *Arch. de l'électr.*, t. II, p. 54 et 80 ; et *Ann. de ch. et de ph.*, 3e série, t. XVI, 474.

dans toutes les parties du circuit, y compris le couple qui fournit le courant, est constante : cette somme se partage inégalement entre ce couple et le fil qui joint les pôles, et d'une manière qui dépend du rapport des résistances qu'ils peuvent présenter. Dans cette série d'expériences, le couple était formé de platine et zinc distillé plongés dans l'acide nitrique concentré, et les pôles étaient réunis par un fil de platine entièrement plongé dans une même quantité du même acide renfermé dans un vase semblable à celui du couple. Ce fil de platine était réuni au zinc et au platine du couple, par des tiges de ce dernier métal assez grosses pour ne pas s'échauffer. La somme des élévations de température dans les deux vases a toujours été la même ; mais l'échauffement dans chacun d'eux dépendait des dimensions du fil de platine [1].

M. A. Favre [2] a confirmé cette loi importante, au moyen de nombreuses expériences faites avec son calorimètre à mercure (II,980). Un petit couple zinc et platine était plongé dans le tube oblique qui s'enfonce dans le calorimètre, et le fil de platine, attaché à deux tiges de cuivre communiquant avec les métaux du couple, était plongé dans le tube d'un second calorimètre. Le gaz hydrogène dégagé dans le couple était recueilli et jaugé avec soin ; il servait de mesure à la quantité d'action chimique, et les résultats étaient rapportés à 1 gramme d'hydrogène dégagé, ou à 32,5 grammes de zinc dissous. Il résulte des expériences de M. Favre, que l'on retrouve dans le liquide du couple et dans le fil conjonctif, la totalité de la chaleur que l'action chimique seule serait capable de développer. « La chaleur confinée dans le couple, et celle qui résulte de la résistance du circuit métallique, quel qu'il soit, sont donc toujours complémentaires pour fournir la chaleur totale due à la somme des actions chimiques. »

1530. Conséquences. — 1° D'après les lois de Joule, la quantité q de chaleur dégagée dans une portion d'un circuit dont la résistance est r, est donnée au bout du temps θ par la formule $q = kri^2\theta$ la quantité totale de chaleur Q développée dans le circuit dont la résistance totale est R, sera, au bout du même temps $Q = kRi^2\theta$.

Nous démontrerons plus loin que l'on a $i = E : R$, en représentant par E la *force électromotrice* qui fournit l'électricité du circuit. Remplaçant i par cette valeur, la formule devient

$$[1] \qquad Q = k\frac{E^2}{R}\theta; \qquad \text{et l'on a} \qquad q = k\frac{r}{R}\frac{E^2}{R}\theta. \qquad [2]$$

pour la quantité de chaleur développée pendant le temps θ, dans *une partie* du circuit dont la résistance est r. On voit que la quantité q, proportionnelle au carré de la force électromotrice, est une fraction de la quantité totale Q, proportionnelle au rapport $r : R$ de la résistance de la partie considérée à la résistance totale.

[1] *Archives de l'électricité*, de M. A. de La Rive, t. III, p. 178.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XL, p. 293.

Les formules [1] et [2] peuvent être présentées sous une autre forme. Soit e la quantité d'électricité qui parcourt le circuit pendant le temps θ ; cette quantité est proportionnelle au temps, et en raison inverse de la résistance totale R ; on a donc $e = k'(\theta : R)$; d'où $\theta = Re : k'$. Substituant dans [1] et [2], et représentant $k : k'$ par K, il vient

[3] $Q = KE^2e$, et $q = K\frac{r}{R}E^2e$. [4]

la formule [3] montre que la quantité Q, indépendante des résistances du circuit, est proportionnelle à la quantité d'électricité e qui le parcourt.

Cette formule coïncide avec celle qui exprime l'échauffement produit par la décharge d'une batterie (1333). En effet, nous avons trouvé pour l'élévation de température dans un fil de diamètre d, $t = ke^2 : d^4s$, e étant la quantité d'électricité, et s la surface armée de la batterie. Or $e : s$ représente la *densité électrique* δ que nous représenterons ici par E, et qui remplace la force électromotrice, on aura donc en substituant, $t = \frac{kEe}{d^4}$; or t varie aussi en raison inverse du temps θ de la décharge ; on a donc $k = k' : \theta$, et comme e est proportionnel à la résistance totale R du circuit, et en raison inverse de la densité électrique E (1333), on aura $k = k' : \theta = k'E : R$. Substituant, il vient $t = \frac{k'E^2e}{d^4R}$. La *quantité de chaleur* q développée dans le fil s'obtiendra en multipliant son échauffement t par sa masse $\frac{1}{4}\pi d^2\Delta$, et par sa capacité calorifique n ; on aura donc

$$q = \tfrac{1}{4}\pi d^2\Delta nt = K\frac{r}{R}E^2e$$

en remarquant que $l : d^2$ représente la résistance particulière r du fil, et réunissant toutes les constantes sous le symbole unique K.

2° Température d'un fil. — La *quantité de chaleur* développée par un courant d'intensité i, dans un fil dont la résistance est r, est donnée par la formule $q = kri^2$. Quand la température du fil est constante, la quantité de chaleur reçue est égale, à chaque instant, à celle qui se perd à l'extérieur. Celle-ci est proportionnelle à la surface πdl du fil, à son pouvoir émissif m et à l'excès t de sa température sur celle de l'air, en appliquant la loi de Newton (II, 748); on a donc

[5] $q = kri^2 = k'\pi dlmt$

Nous avons dit qu'on a aussi $i = E : R$; de plus la résistance r est, comme nous le démontrerons, proportionnelle à la longueur l du fil et en raison inverse de sa section et de sa conductibilité c ; on a donc $r = l : \frac{1}{4}\pi d^2c$ substituant dans [5], il vient

$$q = K\frac{4l}{\pi d^2c}\frac{E^2}{R^2} = \pi dlmt\,; \quad \text{d'où} \quad t = c\frac{1}{md^3c}\frac{E^2}{R^2},$$

en réunissant toutes les constantes en une seule. On voit que t dépend du diamètre du fil, de sa conductibilité, et du coefficient de refroidissement m ; ce qui permet de se rendre compte des phénomènes observés avec des fils de différente conductibilité, et de différents diamètres (1522). Nous voyons que la valeur de t est indépendante de la longueur, mais à la condition que R restera constant, comme nous l'avons déjà vu (1522). Remarquons aussi que la valeur de c doit être celle qui correspond à la température du fil, ce qui explique l'influence du milieu sur l'échauffement (1427).

3° Travail produit dans le circuit. — Nous verrons qu'on peut, au moyen des courants, mettre en mouvement des machines, c'est-à-dire produire du travail mécanique. Dans ce cas, une partie de la chaleur du circuit disparaît et se transforme en travail, et nous trouvons là une nouvelle application de la théorie mécanique de la chaleur (II, 1074). De plus, quand on calcule la quantité de chaleur dégagée dans les actions chimiques qui produisent l'électricité, on trouve que cette quantité est égale à celle que l'on trouve dans le circuit. Ainsi, la quantité de chaleur dégagée par la dissolution d'un équivalent de zinc par l'acide sulfurique hydraté, est toujours la même, qu'il y ait ou non production d'un courant électrique. Elle représente le travail moléculaire accompli dans l'électromoteur.

M. Favre, qui a fait beaucoup d'expériences sur ce sujet, a confirmé le principe, en l'appliquant à une nouvelle évaluation de l'*équivalent mécanique* de la chaleur. Une pile de 5 couples plongée dans un calorimètre, communiquait, par de gros fils de cuivre enveloppés de gutta-percha, avec un *électro-aimant* plongé dans un autre calorimètre, et qui pendant le passage du courant, pouvait faire monter un poids par le moyen de cordons et de poulies placées en dehors du calorimètre. Quand l'électro-aimant était séparé des poulies et ne produisait pas de travail, la quantité de chaleur recueillie dans les deux calorimètres représentait celle qui était développée par la dissolution de la masse de zinc que les couples avaient perdue. Mais quand l'électro-aimant faisait monter le poids et produisait un travail T facile à évaluer, les calorimètres recueillaient une quantité Q′ moindre de chaleur. Une partie Q — Q′ s'était donc transformée en travail; et en divisant Q — Q′ par T, on calculait l'*équivalent mécanique* de la chaleur. M. Favre a trouvé ainsi de 426 à 464 kilogrammètres, et la moyenne a été 444 qui diffère aussi peu qu'on pouvait l'espérer des valeurs obtenues quand la transformation de la chaleur en travail se faisait par d'autres intermédiaires que l'électricité (II, 1076).

Remarquons enfin que si un courant produit des actions chimiques exigeant de la chaleur, cette chaleur est encore empruntée à la chaleur totale du circuit.

4° M. Faraday avait posé en principe que l'électricité fournie par un couple voltaïque était due tout entière à l'oxydation du zinc, et que la combinaison de l'oxyde de zinc avec l'acide sulfurique n'y contribuait aucunement. M. Favre a soumis cette opinion à un contrôle décisif : si elle était vraie, la quantité de chaleur produite devrait être égale à celle que dégage l'oxydation du zinc, soit

42451 calories pour un équivalent ou 32,5 grammes de ce métal, diminuée de la chaleur absorbée par la décomposition de l'eau, laquelle est égale à celle que dégagerait un équivalent d'oxygène et d'hydrogène en se combinant, c'est-à-dire à 34462 calories. La différence étant égale à 7989, on ne devrait pas pouvoir développer dans le circuit extérieur un plus grand nombre de calories, par équivalent de zinc dissous ; or, M. Favre a trouvé jusqu'à 9685 calories. Il y a donc aussi de la chaleur et de l'électricité dégagées dans la combinaison de l'acide sulfurique avec l'oxyde de zinc.

II. Chaleur et lumière dans l'arc voltaïque.

1531. De l'arc voltaïque. — Quand on laisse une petite solution de continuité dans le fil qui réunit les deux pôles d'une forte pile, on obtient des étincelles tellement rapprochées, qu'elles forment une lumière continue, dont l'éclat est surtout éblouissant quand on la fait jaillir entre deux pointes d'un charbon conducteur. Quand la pile est composée d'un grand nombre de couples, on peut éloigner les pointes de charbon, de plusieurs centimètres, et l'espace qui les sépare, reste constamment rempli par une bande lumineuse un peu ovale, dont l'éclat et la température dépassent tout ce qu'on peut obtenir par tous les moyens connus. Cette bande lumineuse, désignée sous le nom d'*arc voltaïque*, a été observée pour la première fois par Davy, au moyen de la pile de 2000 couples, qu'il a rendue célèbre par tant de belles découvertes. L'arc voltaïque s'obtient facilement aujourd'hui avec les piles à charbon. Il suffit de 60 couples du grand format, pour produire de brillants effets. Pour faire l'expérience dans différents gaz, Davy employait un appareil analogue à celui de la *fig.* 1140, deux crayons en plombagine, terminés en pointe et fixés à deux pinces métalliques communiquant avec les pôles de la pile, sont renfermés dans un vase de verre, dans lequel on peut faire le vide. La tige *t* peut glisser dans une boîte à cuir qui permet de rapprocher plus ou moins les charbons. Pour que l'arc lumineux se produise, il faut d'abord que les pointes soient très rapprochées ; mais une fois que l'électricité a pu franchir l'espace qui les sépare, on peut écarter les charbons sans que la lumière cesse de briller ; et à une distance bien plus grande dans le vide que dans les gaz. Dans le vide, Davy a pu dépasser 11 centimètres. Il a aussi obtenu l'arc voltaïque dans divers liquides ; les pointes de charbon devenaient rouge blanc, et il se dégageait beaucoup de gaz provenant de la décomposition du liquide.



Fig. 1140.

Quand on opère dans l'air, les charbons brûlent, et leur distance augmente ;

il faut donc les rapprocher de temps en temps. Davy se servait de charbon de bois calciné. Pour le rendre bon conducteur, on l'étouffe dans le mercure ; mais la lumière est alors moins éclatante, et les vapeurs de mercure ternissent les parois du ballon. On emploie aujourd'hui la plombagine artificielle; on peut alors opérer dans l'air, cette espèce de charbon ne brûlant qu'avec lenteur.

1532. Transport de particules dans l'arc voltaïque. — Une dizaine d'années après la brillante expérience de Davy, M. Silliman étudia l'arc voltaïque au moyen du *déflagrateur* de M. Hare (1434)[1]. Il reconnut qu'il se fait, du pôle positif au pôle négatif, un transport de particules incandescentes de charbon, qu'on peut distinguer nettement en regardant à travers des verres colorés. Le mouvement de ces particules semble peu rapide, et fait paraître l'arc comme agité, et leur répulsion mutuelle concourt à lui donner sa forme ovale. Le charbon négatif s'allonge peu à peu en cône, par l'accumulation des particules transportés, et le charbon positif présente une cavité telle que la masse accumulée au pôle négatif pourrait s'y mouler presque exactement. Quand on opère dans l'air, la pointe négative ne s'accroît pas autant, à cause de la combustion d'une partie des particules, et le charbon négatif est terminé par une surface plane, sans doute à cause de la combustion des bords de la cavité conique.

Le transport des particules dans l'arc électrique, explique pourquoi on peut écarter les charbons quand l'électricité a commencé à franchir l'espace qui les sépare : ses particules servent d'intermédiaires, comme les losanges des tubes étincelants. Aussi, peut-on faire jaillir l'arc lumineux sans rapprocher d'abord les charbons, en faisant partir entre eux une forte étincelle électrique qui produit un transport de particules, comme l'a prouvé M. Fusiniéri (1337); l'expérience en a été faite d'abord par M. Daniell, à la demande d'Herschell. Un courant d'air peut rompre l'arc ; sans doute en entraînant les particules.

Influence de la substance des électrodes. — Le transport des particules a encore lieu quand on remplace les charbons par d'autres substances; mais l'éclat de l'arc et sa longueur dépendent de ces substances. Avec le platine la longueur est moindre qu'avec le charbon ; avec le platine en éponge, elle est à peu près la même, et M. de La Rive a reconnu que les particules se déposent au pôle négatif, sous forme de petites masses ramifiées faciles à détacher. M. Grove a fait des expériences nombreuses sur ce sujet[2] ; il range les métaux dans l'ordre qui suit, en commençant par ceux qui donnent l'arc le plus long et le plus brillant : *potassium, sodium, zinc, mercure, fer, étain, plomb, antimoine, bismuth, cuivre, argent, or, platine.* Il y a transport de particules métalliques, du pôle positif au pôle négatif, dans le vide ou dans un gaz qui ne contient pas d'oxygène ; et de particules d'oxyde, dans l'air ou l'oxygène.

Quand les électrodes en charbon se touchent, on entend des craquements particuliers, que M. de La Rive attribue à l'arrachement des particules de

[1] *Annales de chimie et de physique,* 2e série, t. XXIV, p. 216.

[2] *Bibliothèque universelle de Genève* (Sc. et arts), t. XXV (1840), p. 326.

charbon. Ces craquements n'ont pas lieu avec les métaux ; ce qui peut tenir à ce que les particules entraînées sont alors à l'état de fusion, comme l'a conclu M. Van-Breda, d'après leur forme arrondie. La séparation des particules semble due à une répulsion semblable à celle qui existe, comme nous le verrons dans l'*électro-dynamique*, entre les parties d'un fil traversé par un courant.

On voit, d'après ce qui précède, que l'arc sera d'autant plus long que la substance des électrodes aura moins de ténacité ou sera plus fusible ; aussi le charbon, à cause de sa nature friable, donne-t-il l'arc le plus long. M. de La Rive a remarqué que l'arc ne se produit avec une pile peu énergique, qu'après que l'un des charbons en contact a rougi et a perdu par là de sa ténacité. Des métaux en poudre impalpable tassée dans des tubes, donnent aussi un arc plus long que les mêmes métaux compacts. Il résulte encore de là que, si les électrodes sont de substance différente, la longueur de l'arc devra dépendre du sens du courant. C'est, en effet, ce qui a lieu. Par exemple, avec des électrodes en platine et en zinc, l'arc est beaucoup plus brillant quand le zinc est positif que dans le cas contraire. M. Grove a constaté que, en général, l'arc est d'autant plus long et brillant que l'électrode positif est plus facile à volatiliser et plus oxydable. MM. Fizeau et Foucault ont vu que l'arc est plus long quand, les électrodes étant en charbon et argent ou platine, le charbon est positif. M. Tyrtow ayant pris pour électrodes, du mercure et un fil métallique, vit ce dernier rougir et fondre quand il était positif ; quand le mercure était positif, il n'apercevait, au moment du contact, que des étincelles bleuâtres, et le mercure se vaporisait avec bruit.



Fig 1141.

La forme des électrodes a aussi une certaine influence sur la longueur de l'arc : M. de La Rive les ayant formés avec un cône en platine et une plaque du même métal placés sous une cloche (*fig.* 1141) a vu que l'arc, qui formait un cône ayant sa base à la lame, était plus long quand celle-ci était positive [1]. La tige *t* pouvait être abaissée au moyen d'une crémaillère et d'un pignon denté, de quantités mesurées au moyen d'un cercle divisé *r*. Ayant opéré avec une pile de Grove de 50 couples fortement chargée, M. de La Rive vit se former, dans le vide, sur la plaque positive, une tache circulaire bleuâtre, qui se déposait également dans l'air, mais avec un diamètre moitié moindre et une couleur moins vive. Cette tache ne se formait pas dans l'hydrogène, ce qui montre qu'elle était due à une oxydation. Quand la plaque était négative, il se produisait encore une tache sur sa surface, mais elle était blanche et formée de particules de platine. Ces taches circulaires se montraient, que la plaque fût verticale, ou qu'elle fût horizontale. M. Grove a fait beaucoup d'expériences de ce genre [2].

[1] *Bibl. univ. de Genève* (Archives des sciences), t. IV p. 345.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXVII, p. 376.

Transport du pôle négatif au pôle positif. — La nature de l'électrode négatif a aussi de l'influence sur la longueur de l'arc. M. de La Rive ayant remplacé la pointe de platine de son appareil par une pointe en coke, put obtenir un arc deux fois plus long, quoique le coke fût négatif, et que le cône lumineux fut remplacé par une multitude de jets partant de la plaque, et allant aboutir à différents points du coke.

Cette influence de l'électrode négatif vient de ce qu'il y a aussi transport de particules, de cet électrode à l'électrode positif, comme l'a montré M. Van-Breda [1]; seulement il y a toujours simultanément transport plus abondant dans le sens opposé. Par exemple, avec deux boules de fer entre lesquelles il faisait jaillir l'arc dans le vide, au moyen d'une forte étincelle, il trouva que la boule négative avait perdu 55 milligrammes; mais la boule positive en avait perdu 309 dans le même temps. L'une des boules de fer ayant été remplacée par du charbon préparé comme celui de la pile de Bunsen (1467), la boule de fer perdit le même poids, quel que fût le sens du courant; mais le charbon perdait davantage quand il formait l'électrode positif. Enfin, une plaque de fer épaisse et isolée ayant été placée dans le vide entre deux électrodes en cuivre, et l'arc ayant été excité par une forte étincelle, la matière lumineuse sembla sortir des électrodes, sous forme de jets resplendissants qui rejaillissaient en gerbes de feu contre la plaque, et les deux boules de cuivre furent recouvertes de poussière ferrugineuse provenant de la plaque. La boule positive gagna 63 milligrammes, et la négative, 360.

Il résulte de ce qui précède, que l'arc voltaïque doit sa permanence aux particules qui le traversent. C'est pourquoi la quantité d'électricité qui franchit l'espace qui sépare les électrodes, dépend de la quantité de particules transportées, et par conséquent de la nature de ces électrodes. En effet, un voltamètre ayant été introduit dans le circuit, et les électrodes étant à une distance de 3^{mm}, on trouva dans le voltamètre, au bout d'une minute, 45 centimètres cubes de gaz, quand ils étaient en étain; 25, en zinc; 29, en coke; 27, en fer; 26, en laiton; 23, en cuivre. La pile était composée de 60 couples de Grove, et le voltamètre recevait 46 centimètres cubes en une minute, quand les électrodes étaient en contact. Du reste, l'existence du courant dans l'arc voltaïque peut se prouver directement : M. Matteucci ayant introduit en deux points de l'arc, les extrémités de fils de platine enchâssés dans des tubes de verre, et en relation avec un réomètre, vit aussitôt l'aiguille de ce dernier se dévier par une dérivation du courant qui allait d'un électrode à l'autre.

1533. **Echauffement inégal des électrodes.** — Les électrodes s'échauffent, pendant le passage de l'électricité dans l'espace qui les sépare; quand ils sont de nature différente, celui dont la substance est moins bonne conductrice s'échauffe le plus, comme cela a lieu dans un circuit continu (1520). Mais ce qu'il y a de remarquable, c'est que, dans le cas où les électrodes sont

[1] *Bibliothèque de Genève* (Archives des sciences), t. III, p. 32.

de même substance, l'échauffement est toujours beaucoup plus prononcé à l'électrode positif qu'à l'électrode négatif. M. de La Rive a vu la pointe de platine de son appareil (*fig.* 1141) fondre quand elle était positive et ne s'échauffer que faiblement quand elle était négative. Dans ce dernier cas, la plaque opposée rougissait vivement et pouvait être trouée. Le fer, le cuivre, l'argent, l'argentan, lui ont donné des résultats semblables. On peut reconnaître aussi, avec des cônes en fer, que le cône positif est brûlant pendant que le cône négatif n'est pas sensiblement chaud. M. Matteucci a confirmé cette loi, en mesurant la température des électrodes, au moyen d'une aiguille thermo-électrique enfoncée dans un petit trou pratiqué près de l'extrémité [1]; l'arc était produit par un appareil d'induction dont nous parlerons plus tard. M. Matteucci a aussi reconnu que la différence de température des électrodes est d'autant plus prononcée, que la substance dont ils sont formés est moins conductrice et plus friable. Cette différence est faible quand ils sont plongés dans du gaz hydrogène; ce qui tient sans doute au pouvoir refroidissant de ce gaz, qui, en abaissant la température, augmente la conductibilité (1527).

La différence de température des électrodes explique pourquoi le transport des particules se fait principalement, du pôle positif au pôle négatif. M. Matteucci a pu observer ce transport au moyen d'un microscope : les pointes étant en fer, il vit des globules en fusion rouler avec rapidité sur la pointe positive, et s'élancer vers la pointe négative pour s'y déposer et former des champignons. Si les deux pointes étaient en contact, la pointe positive devenait rouge, et si on l'écartait lentement de l'autre, on parvenait à obtenir un arc de matière fondue incandescente, très brillant, et qui coulait évidemment du pôle positif au pôle négatif.

1534. Influence du nombre des couples sur la longueur de l'arc. — M. Despretz, dans un remarquable travail sur l'arc voltaïque, a cherché l'influence sur sa longueur, du nombre et de la disposition des couples de la pile [1]. Les couples ayant été ajoutés successivement les uns à la suite des autres, la distance des cônes de charbon, disposés verticalement le pôle positif en haut, allait en augmentant plus que proportionnellement au nombre des couples. Ainsi, l'arc donné par 100 couples était presque quadruple de celui de 50 couples; tandis que l'arc de 200 couples n'était pas même triple de celui de 100; avec 600 couples, l'arc qui était de 20 centimètres, n'avait que 7 à 8 fois la longueur de celui de 100 couples.

Au lieu de placer les couples les uns à la suite des autres, M. Despretz les a ensuite réunis par groupes de 25 disposés en séries parallèles, de manière à former une pile d'un même nombre de couples, successivement 2, 3, 4..., 24 fois plus grands. Il a trouvé que l'arc avait 1 millimètre pour trois séries parallèles, et 11^{mm},5 pour les 24 séries; tandis que les 600 éléments placés les uns à la suite des autres donnaient un arc 14 fois plus long; ce qui montre

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXVII, p. 41, et XXXII, p. 350.

l'influence de la tension. Mais ce qu'il y a de remarquable, c'est que le contraire a lieu quand les charbons sont placés horizontalement : six séries de 100 couples disposés parallèlement produisirent un arc de 40^{mm},5, tandis que les 600 éléments placés les uns à la suite des autres n'ont donné qu'un arc de 27^{mm},6. Ces résultats, sur lesquels nous reviendrons, se rattachent à des effets magnétiques, dont nous allons parler.

1535. Action du magnétisme sur l'arc voltaïque. — Lors de la découverte d'Œrsted sur la déviation de l'aiguille aimantée par les courants, Arago annonça que l'arc voltaïque devait exercer une action semblable, et être lui-même influencé par les aimants. Davy constata, en effet, que l'arc est attiré par le pôle d'un fort aimant présenté transversalement, ou bien en est repoussé, suivant le sens du courant et la nature du pôle de l'aimant. L'arc prend alors une courbure d'autant plus prononcée, que l'aimant est plus puissant. M. de La Rive a vu même l'arc se rompre sous l'influence d'un aimant très énergique, qui le détournait trop fortement de sa direction.

Le magnétisme agit encore sur l'arc, dans le sens longitudinal : M. de La Rive [1] ayant produit l'arc entre deux barreaux de fer doux terminés en pointe, le fit cesser subitement en aimantant ces barreaux, soit par l'influence d'aimants puissants, soit en faisant passer le courant d'une seconde pile dans un fil enroulé en hélice autour de ces barreaux. Pour reproduire l'arc, il fallait rapprocher les pointes de fer; mais alors cet arc présentait un aspect particulier; les particules semblaient se détacher difficilement de la pointe positive, et étaient lancées dans toutes les directions, en faisant entendre un sifflement aigu semblable à celui d'un sifflet à vapeur. Les résultats restaient les mêmes, quand les pôles magnétiques des pointes de fer étaient de même nom, et quand ils étaient de nom contraire.

M. de La Rive a encore procédé en plaçant sur l'un des pôles d'un fort *électro-aimant*, une plaque d'un métal peu fusible, et au-dessous une pointe de même métal. L'arc est alors plus court qu'en l'absence de l'électro-aimant, et quand la plaque est positive, on entend un sifflement aigu. Si c'est la pointe qui est positive, l'arc est projeté vers les bords de la plaque dans une direction qui dépend du sens du courant et de la nature du pôle magnétique sur lequel repose la plaque. A chaque instant l'arc est rompu, et à chaque rupture, on entend une explosion semblable à celle que produit une bouteille de Leyde. Ces explosions se produisent aussi quand la plaque est remplacée par une seconde pointe; elles peuvent être comparées au bruit d'une arme à feu, quand la pile est très énergique et l'électro-aimant très puissant. Dans ce cas, il y a sifflement quand, la pointe positive s'échauffant à un point voisin de sa fusion, l'arc reste continu. Si, par exemple, l'une des pointes est en platine, et l'autre en cuivre, il y a sifflement quand la pointe de platine est positive, et ruptures fréquentes accompagnées d'explosions, quand elle est négative; le cuivre,

[1] *Bibliothèque universelle de Genève* (Sciences et arts), t. IV, p. 355

dans ce dernier cas, s'échauffant beaucoup moins que le platine dans le premier.

M. Quet, ayant placé de part et d'autre d'un arc voltaïque vertical produit entre deux charbons, les pôles A, B d'un électro-aimant (*fig.* 1142), vit cet arc se courber dans un plan perpendiculaire à la ligne AB, et dans un sens dépendant de la direction du courant de l'arc et de la position relative des pôles A et B; si l'on change ceux-ci de place, l'arc se courbe donc en sens opposé. Si l'on rapproche les pôles A, B, l'arc se courbe de plus en plus et finit par se transformer en un jet horizontal *r*, semblable au dard produit dans une flamme par un chalumeau. Ce dard, qui peut avoir une longueur égale à 8 à 10 fois la distance AB, lance des particules de charbon, et produit un bruissement assez fort. En disparaissant, il fait entendre un bruit sec et insense[1].

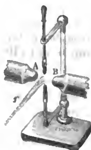


Fig. 1142.

Action du magnétisme terrestre. — La direction de la ligne des électrodes a une grande influence sur la longueur de l'arc voltaïque. M. Despretz a reconnu que l'arc vertical a le plus de longueur quand le pôle positif est en haut, quelle que soit la nature des électrodes, pourvu qu'ils soient conducteurs[2]. Dans une expérience faite avec 600 couples de Bunsen, arrangés en 6 séries parallèles, la plus grande distance qu'on pût donner aux charbons était de 74 millimètres, quand le pôle positif était en haut, et de 56 millimètres seulement, quand il était en bas. Dans d'autres expériences, le rapport entre les longueurs de l'arc était de 6 à 7. Quand la ligne des charbons était horizontale, et perpendiculaire au méridien magnétique, l'arc était plus long quand le pôle positif était à l'est que lorsqu'il était à l'ouest. Dans le premier cas, le pôle austral de la terre était à la gauche du courant qui parcourait l'arc. Avec 100 couples, les longueurs étaient $13^{mm},4$ et $11^{mm},35$; avec 200 couples en deux séries parallèles, elles étaient $20^{mm},8$ et $1^{mm},5$.

Ces expériences, ainsi que celles que nous avons citées (1535), ont été faites dans l'air à la pression ordinaire. Les charbons étaient renfermés dans une boîte cubique en bois, de 80^{cm} de côté, et soutenus par des tiges de cuivre isolées, dont l'une pouvait être poussée vers l'autre au moyen d'un pignon denté commandant une crémaillère. Après la suppression du courant, on ouvrait une porte, et l'on mesurait au compas la distance des pointes de charbon avec une approximation de $\frac{1}{4}$ de millimètre. L'arc voltaïque était observé à travers une glace teinte en bleu, pour amortir l'éclat de la lumière, qui, avec une pile de 100 couples, est déjà capable d'occasionner des maux d'yeux très

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XXXIV, p. 805.

[2] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XXX, p. 373.

douloureux; l'arc d'une pile de 600 couples produit, en un instant, des maux de tête et d'yeux très violents, et la peau du visage est rubéfiée comme par un fort coup de soleil.

1536. Effets calorifiques de l'arc voltaïque. — La température de l'arc voltaïque est la plus élevée que l'on connaisse; on l'a utilisée pour opérer la fusion des substances les plus réfractaires, même de celles qui conduisent mal l'électricité. Des baguettes de fer ou d'acier introduites dans l'arc, y brûlent dans l'air en lançant de vives étincelles. Quand on veut opérer des fusions, on place les électrodes l'un au-dessus de l'autre, comme dans la *fig.* 1142. L'électrode inférieur est formé d'un fragment de charbon dur creusé en forme de coupe dans laquelle on place le corps à fondre; cet électrode reçoit l'électricité positive. Un cône en charbon forme l'électrode négatif. Quand on le rapproche du fond de la coupe, l'arc se produit, et la matière placée au pôle positif, qui s'échauffe le plus (1533), entre en fusion, pendant que quelques-unes de ses particules sont transportées au pôle négatif. On a essayé bien des fois de fondre le diamant ou le charbon par ce moyen, mais on n'a pas d'abord réussi. M. Jacquelain était parvenu cependant à ramollir le diamant en le transformant en une matière noire semblable à la plombagine. Il était donné à M. Despretz, non-seulement de fondre, mais encore de volatiliser le charbon, et d'obtenir la fusion de tous les corps qui avaient résisté jusque-là aux agents calorifiques les plus énergiques.

Expériences de M. Despretz [1]. — M. Despretz a d'abord opéré en réunissant les trois sources les plus puissantes : la chaleur de l'arc voltaïque, le chalumeau à oxygène et hydrogène, et la chaleur solaire concentrée au foyer d'une lentille à échelons de 90^{cm} de diamètre. La pile de Bunsen avait 185 couples : ses effets étaient augmentés par l'addition des deux autres sources ; car la magnésie dure et compacte, qui ne prenait que l'état pâteux sous l'action de la pile seule, se volatilisait immédiatement en produisant une fumée blanche, avec le concours de la lentille. Une baguette d'anthracite, de 1^{mm} de diamètre et de 30^{mm} de longueur, se ramollissait sous l'action des deux mêmes sources, au point de se courber sous son propre poids.

Ayant alors réuni un plus grand nombre de couples à charbon, M. Despretz a pu réaliser la fusion et la volatilisation d'une foule de substances, dans l'arc voltaïque seul. Pour opérer dans l'air, il employait la boîte décrite ci-dessus (1535) : pour opérer dans le vide ou dans les gaz à la température ordinaire, il se servait d'une grande cloche en verre placée sur la platine mobile d'une machine pneumatique; une plaque de tôle et un grillage métallique défendaient la platine et la cloche, de la projection des globules incandescents. Enfin, l'appareil (*fig.* 1143) servait aux expériences dans les gaz comprimés. Un vase en fonte de 10 litres de capacité, surmonté d'un couvercle mobile, est muni d'une tubulure qui reçoit, par l'intermédiaire d'une boîte à

[1] *Comptes-rendus de l'Acad. des sc.*, t. XXXVIII, p. 755, et XXIX, p. 48, 545, et 709.

cuir, une tige isolée portant un cône de charbon. Une pince à vis sert à retenir une lame de cuivre *e*, que l'on met en communication avec un des pôles de la pile. Une crémaillère *c*, isolée par une sphère de verre *i*, et commandée par le pignon denté *p*, sert à rapprocher plus ou moins le charbon mobile du charbon fixe qui est au-dessous, et qui est mis en communication avec l'autre pôle de la pile, par une tubulure latérale et une lame de cuivre *e'*. Les gaz sont introduits par le robinet P; leur pression est indiquée par le manomètre *m*. Deux tubulures *v*, *v*, garnies de glaces, servent à voir dans l'intérieur de l'appareil. Un second couvercle, muni de deux boîtes à cuir et soutenant deux charbons, servait aux expériences dans lesquelles un charbon vertical était plongé dans l'arc formé entre deux charbons horizontaux.

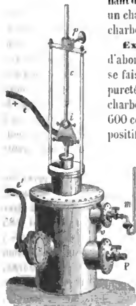


Fig. 1143.

Expériences sur le charbon. — M. Despretz a d'abord observé la volatilisation du charbon. L'expérience se faisait dans le vide, soit avec du charbon d'une grande pureté obtenu par la calcination du sucre, soit avec du charbon de cornue. La pile était composée de 500 ou 600 couples en 5 ou 6 séries parallèles. Dès que le charbon positif s'était usé, il devenait d'un blanc éclatant, et l'on voyait tout à coup un nuage noir, semblable, sauf la couleur, à celui que produit l'iode jeté sur le feu, et il se déposait une poussière noire sur les parois du vase dans lequel on opérait. Si ce vase était trop étroit, il était brisé. Cette expérience, répétée un grand nombre de fois, prouve que le charbon est plus facile à volatiliser qu'à fondre.

Pour obtenir la fusion du charbon, M. Despretz a opéré dans l'azote comprimé à 2 à 3 atmosphères. Il a vu une fine baguette d'anthracite, de graphite, de charbon de sucre ou d'essence de térébenthine, fixée entre les électrodes, se ramollir, se courber, puis se détacher de l'électrode supérieur et se courber en S. Souvent la partie supérieure se gonflait au moment de la rupture, et ressemblait à du mâchefer. La pile était composée de 600 couples, disposés tantôt en 6 séries de 100, tantôt en 12 séries de 50. Le même physicien a vu, sur des fils de différentes sortes de charbon, ayant diverses longueurs, et de 1^{mm} jusqu'à 41^{mm} de diamètre, la matière paraître se rassembler à la partie inférieure où se faisait la rupture, et les parties séparées présenter un diamètre double et même triple du diamètre primitif. Il est parvenu aussi à souder des baguettes de divers charbons ramollies par le feu électrique. D'autres expériences ont été faites en mettant dans un petit creuset en charbon formant l'électrode positif, des fragments ou des poussières de divers charbons : des

fragments ont pénétré dans le creuset et s'y sont incrustés; le fond du creuset s'est trouvé couvert d'un amas de globules ayant la couleur grise du graphite; de l'anthracite, du graphite, se sont étalés sur le fond du creuset, comme du verre noir. La chaleur était augmentée par un courant d'oxygène. Des diamants se sont transformés en graphite et ont donné aussi de petits globules fondus. En général, tout charbon devient d'autant moins dur qu'il est soumis plus longtemps à une température élevée; il finit, même le diamant, par se transformer en graphite.

Il résulte de ces expériences, et de cette circonstance que le graphite cristallise en hexaèdre, tandis que les formes du diamant dérivent de l'octaèdre, que ce n'est pas par fusion ou volatilisation brusque, qu'on peut espérer d'obtenir le charbon cristallisé, c'est-à-dire à l'état de diamant. M. Despretz a alors procédé par volatilisation lente dans le feu électrique : il disposa à la partie inférieure du vase (*fig.* 1140), un cylindre de charbon de sucre, et à la partie supérieure, un faisceau de 12 fils de platine très fins. Après avoir fait le vide, il produisit l'arc électrique au moyen de la *bobine de Ruhmkorff*, appareil que nous décrirons plus tard, et qui permet d'obtenir, au moyen de quelques couples seulement, un arc composé d'intermittences très rapprochées, et sans échauffement intense des électrodes. L'appareil étant resté en action pendant plus d'un mois, les fils de platine se trouvèrent enveloppés d'une légère couche noire qui, examinée au microscope avec un grossissement de 30 fois, parut parsemée de petits octaèdres noirs, parmi lesquels il y en avait de blancs, opalins, translucides, dont M. Despretz compare l'éclat à celui des diamants bruts. Cette poussière, mêlée à un peu d'huile, a pu polir rapidement des rubis, pierres qui ne peuvent être polies à l'huile que par la poudre de diamant; d'où l'on peut conclure que les cristaux obtenus sur les fils de platine étaient de très petits diamants.

Expériences sur diverses substances. — M. Despretz a fondu et volatilisé, dans l'arc voltaïque, une foule d'autres snbstances très réfractaires. L'oxyde de zinc, la chaux, la magnésie se volatilisent plus facilement qu'ils ne fondent; cependant ils ont été réduits en petites masses transparentes comme du verre. L'alumine, le rutile, l'anatase, la nigrine, l'oxyde de fer, le disthéne, fondent d'abord en globules, puis donnent des vapeurs.

Le bore et le silicium ont été fondus facilement, dans un creuset de charbon de sucre, en un globule un peu vitreux à sa surface. Le bore est plns fusible et plus volatil que le silicium; il est moins dur que ce dernier. On opérait dans l'azote au moyen de 600 couples, disposés en 6 séries parallèles.

Le titane fond dans les mêmes conditions, et donne des vapeurs qui se déposent en globules sur les bords du creuset; ces globules, taillés, présentent une couleur jaune d'or un peu pâle. Le tungstène donne des résnltats analogues; il est d'un gris d'acier, et tellement dur, qu'il raie le rubis et qu'on ne peut le polir qu'avec la poudre de diamant.

M. Despretz a pu fondre de grandes quantités de certains métaux, dans un

creuset en charbon servant d'électrode positif. En quelques minutes, il a fondu 250 grammes de rognures de platine, et, en un instant, 80gr de palladium, et aurait pu fondre beaucoup plus de ces deux métaux. En opérant sur quelques grammes, il a volatilisé le platine de manière à en couvrir une capsule de porcelaine de 10cm de diamètre, fixée au-dessus du charbon supérieur.

1537. **LUMIÈRE DE L'ARC VOLTAÏQUE.** — L'arc voltaïque répand une lumière tellement vive, que l'œil ne peut en supporter l'éclat. Les flammes des lampes placées dans le voisinage ressemblent à des corps rouges et sombre, et projettent des ombres comme le feraient des corps opaques. La vivacité de cette lumière dépend principalement des quantités d'électricité, c'est-à-dire de la grandeur des couples, et fort peu de leur nombre. En effet, MM. Fizeau et L. Foucault [1] ont trouvé sensiblement la même intensité, avec 40 couples et avec 80 couples placés les uns à la suite des autres; tandis que deux séries parallèles de 40 couples leur ont donné une intensité beaucoup plus grande. M. Despretz est arrivé aux mêmes résultats; il a constaté, de plus, que l'intensité augmente à peu près proportionnellement au nombre des séries de 100 couples qu'il disposait parallèlement, du moins jusqu'à la limite de 6 séries, qu'il n'a pas dépassée. Si, au contraire, les couples étaient placés bout à bout, l'augmentation était bien moins prononcée; à partir de 100 couples, elle était même à peine sensible jusqu'à 600. M. Despretz comparait les intensités de la lumière, par divers procédés que nous indiquerons dans l'optique; entre autres, en cherchant la distance à laquelle il cessait de pouvoir lire nettement une page imprimée.

La lumière de l'arc n'a pas partout le même éclat; M. Despretz y a remarqué des parties obscures : quand la ligne des charbons est horizontale, et qu'on augmente peu à peu leur distance, l'arc passe d'abord en ligne droite, puis on voit un espace obscur au-dessus et au-dessous de la ligne des charbons, et à la partie supérieure, la lumière se termine par un arc circulaire. Cette espèce de voûte s'élève peu à peu, devient un angle aigu, et l'arc se rompt. M. Despretz a encore constaté, dans l'arc voltaïque, l'existence de bandes *transversales*, alternativement plus brillantes et plus sombres. Ce phénomène, connu sous le nom de *stratification de la lumière électrique*, est surtout très marqué dans l'arc produit par les appareils d'induction, avec lesquels il a été découvert; nous y reviendrons en traitant de ces appareils.

La lumière prend naissance au pôle négatif. — M. Neef distingue dans l'arc, deux espèces de lumières : l'une, propre à l'électricité, et qu'il appelle *flamme froide*; l'autre due aux particules entraînées quand les électrodes se sont suffisamment échauffés, et qu'il nomme *lumière secondaire*. En examinant au microscope les petites étincelles qui jaillissent entre deux lames de platine qui servaient à fermer et à interrompre le circuit, il a reconnu que

[1] *Archives de l'électricité*, de M. A. de La Rive, t. IV, p. 318.

la lumière ne se montrait que sur la lame négative [1]. Ce fait important a été confirmé depuis, et M. Ruhmkorff a remarqué, au moyen de son appareil d'induction, que dans le vide, la boule de platine qui sert d'électrode négatif est entièrement entourée, ainsi que la tige qui la supporte, d'une belle lumière violette, tandis que la boule positive laisse échapper une aigrette de lumière pourprée. M. Despretz a reconnu qu'un petit thermomètre dont le réservoir est plongé dans la lueur violette, monte de quelques degrés; si l'on renverse le courant, ce thermomètre baisse, pendant qu'il est plongé dans la lumière rouge.

Ces expériences ayant été faites avec l'arc d'induction, il était nécessaire de les vérifier avec l'arc voltaïque. M. Moigno a vu constamment que lorsqu'on rapprochait les charbons pour établir l'arc au moyen d'une forte pile, la lumière apparaissait d'abord au pôle négatif, le charbon positif restant obscur [2]; mais bientôt ce dernier s'échauffait, le transport des particules s'établissait, et la lumière était dès lors beaucoup plus vive au pôle positif qu'au pôle négatif, comme MM. Fizeau et Foucault l'avaient déjà constaté. Enfin, quand l'électricité d'une machine positive traverse, d'une manière continue, l'*œuf électrique* (1284), on voit aussi la boule négative qui communique avec le sol, enveloppée d'une lueur violette pendant que la boule qui apporte le fluide positif laisse échapper une gerbe purpurine. On peut donc conclure, avec M. Neef, que la lumière prend naissance autour de la boule négative, tandis que la chaleur se développe principalement à l'électrode positif (1533).

Propriétés de la lumière de l'arc voltaïque. — La lumière de l'arc voltaïque a, avec la lumière du soleil, une grande ressemblance d'aspect, et de nombreuses analogies dans ses propriétés. Peu de temps après l'expérience de Davy, Brande reconnut qu'elle provoque la combinaison du chlore avec l'hydrogène, et qu'elle colore le chlorure d'argent..., comme le fait la lumière du soleil. M. de La Rive a constaté qu'elle agit aussi sur la couche sensible des plaques daguerriennes; il a pu faire l'image photographique d'un buste éclairé par la lumière électrique. Il a reconnu de plus, ainsi qu'Arago, que les rayons de cette lumière, comme ceux du soleil, ne possèdent pas la *polarisation optique*. La lumière de l'arc a encore la propriété de rendre *phosphorescents*, c'est-à-dire lumineux dans l'obscurité, les corps qui le deviennent sous l'influence des rayons solaires. Ce résultat n'est pas dû au contact direct de l'électricité; car, MM. Biot et Becquerel ont constaté que, si la substance est exposée à la lumière électrique dans des tubes de verre hermétiquement fermés et de différentes couleurs, la phosphorescence, qui se montre au plus haut degré dans les tubes violets, n'a pas lieu dans les tubes en verre rouge. Nous étudierons, dans le livre suivant, le *spectre* formé par la lumière de l'arc, et nous verrons qu'il diffère en plusieurs points du spectre solaire.

[1] *Bibl. univ. de Genève* (Arch. des Sc.), t. I, p. 30, et t. XXX, p. 391.
[2] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XXII, p. 359.

MM. Fizeau et Foucault ont comparé l'intensité de la lumière de l'arc à celle du soleil et à la lumière Drummond (II,1058)[1] par des méthodes que nous ferons connaître dans l'optique. Ils ont trouvé, en se servant d'une pile de Bunsen de 92 couples disposés en deux séries de 46, que la lumière dégagée au charbon positif, où elle a le plus d'intensité, est comprise entre $\frac{1}{2}$ et $\frac{1}{3}$ de celle du soleil à deux heures, par un ciel très pur. L'expérience était faite au mois d'août. Le rapport des deux lumières était de 1 à 2,59. La lumière Drummond ne donnait que $\frac{1}{146}$ de celle du soleil. M. Bunsen a trouvé que la lumière de l'arc produit par 48 de ses couples, entre deux charbons distants de 7^{mm}, équivalait à celle de 572 bougies. Pendant une heure, la pile avait dépensé 300 grammes de zinc, 456^{gr} d'acide sulfurique, et 608^{gr} d'acide nitrique ayant pour densité $\frac{1}{306}$.

1538. Eclairage électrique. — Pendant longtemps, l'expérience de Davy sur l'arc voltaïque n'a pu être répétée que très rarement, à cause de la difficulté de réunir un très grand nombre d'éléments. L'invention de la pile d'Young (1434), dont la disposition permet de réunir un grand nombre de couples dans un petit espace, a permis de répéter facilement cette expérience. Enfin, l'invention des piles à charbon, dont il suffit de réunir 50 éléments pour obtenir un arc de 7 à 8 millimètres de longueur, a facilité l'étude de ce brillant phénoméne, et a fait concevoir l'idée de l'appliquer à l'éclairage.

Dans ces applications, on emploie le charbon de cornue ; malheureusement il est assez impur, et renferme des silicates, qui fondent et donnent lieu à des scintillements très incommodes, et même à la suppression brusque de l'arc. On a cherché à purifier ce charbon au moyen du chlore, mais on n'a pas encore obtenu de résultats complets. Dans les premiers essais, on était obligé d'avoir constamment prés de l'appareil, une personne chargée de rapprocher les charbons, qui s'usent plus ou moins rapidement; sans quoi l'arc n'aurait pas tardé à disparaître. On a imaginé, depuis, des *régulateurs* très ingénieux, au moyen desquels les charbons sont rapprochés convenablement dés qu'ils se sont raccourcis d'une certaine quantité. Le mouvement qui leur est imprimé est la conséquence de l'affaiblissement même qu'éprouve le courant par l'augmentation de la distance. Ces appareils fonctionnent donc d'eux-mêmes ; leur jeu est fondé sur l'emploi des *électro-aimants ;* nous les décrirons plus tard.

Depuis l'invention des régulateurs, la lumière électrique a reçu une foule d'applications; on s'en est servi pour embellir les fêtes publiques, pour produire différents effets, dans les théâtres. On l'emploie fréquemment pour remplacer les rayons solaires dans les expériences sur la lumière; nous verrons dans l'optique les dispositions adoptées pour cela. Certains photographes s'en servent pour éclairer les objets qu'ils veulent reproduire avec une grande vivacité de tons, en l'absence du soleil ; M. J. Dubosc en a fait usage pour photographier des objets microscopiques fortement grossis par un systéme de lentilles.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. IX, p. 370.

Une des applications les plus heureuses de la lumière voltaïque, est celle qu'on en a faite aux travaux de nuit. Nous citerons les travaux du Louvre, du pont Notre-Dame, du pont du Rhin, à Kehl. Avec un seul appareil, on éclaire un grand nombre d'ouvriers, avec une régularité qu'on ne peut obtenir par aucun autre moyen. Par exemple, deux appareils ont suffi aux docks Napoléon pour éclairer pendant plusieurs mois 800 ouvriers, à une distance de plus de 100 mètres. Les hommes les plus éloignés étaient illuminés comme par un beau clair de lune. La dépense totale, par soirée de 3 à 4 heures, s'élevait, pour les deux appareils, à 38 fr. 08 c. ; ce qui fait 4,75 centimes par ouvrier. La lumière électrique pouvant être renfermée dans un vase complétement clos, on a eu l'idée de l'employer à éclairer les travaux sous-marins, à éclairer les galeries des mines infestées par des gaz explosibles.

M. Martin de Brette a proposé d'appliquer l'éclairage électrique à l'art de la guerre, pour faire des signaux, démasquer les travaux nocturnes de l'ennemi, illuminer le terrain dans les reconnaissances, etc. La navigation peut aussi tirer un parti très utile de cette espèce de lumière : appliquée aux phares, elle leur donne une portée bien plus grande que la flamme de l'huile avec les becs les plus perfectionnés. Les navires, munis du feu électrique illuminant l'espace à une grande distance, ne seraient plus exposés à ces abordages, dont les conséquences terribles viennent de temps en temps épouvanter la navigation, depuis que l'on construit des navires à vapeur à grande vitesse. Munis d'un appareil projetant une vive lumière en avant, ils pourront entrer sûrement dans le port, pendant la nuit la plus sombre, et la navigation fluviale pourra continuer pendant l'obscurité, même dans les passages les plus difficiles. Il serait avantageux, dans ce cas, de produire l'électricité avec des *appareils d'induction*, qui n'exigent qu'un petit nombre de couples.

On a proposé d'appliquer la lumière électrique à l'éclairage des places publiques, des rues, etc. Mais il y aura toujours un grand désavantage à n'employer qu'un seul centre lumineux, dont les effets vont en diminuant rapidement avec la distance ; aussi, M. Wartmann, M. Quirini, M. Deleuil ont-ils proposé d'employer plusieurs centres servis par la même pile, et le premier a reconnu que la somme des lumières produites est égale à la lumière que donnerait un seul centre. Mais, indépendamment des nombreuses difficultés pratiques qui se sont présentées dans les essais que l'on a tentés, il faut remarquer que la dépense serait beaucoup plus grande que celle du gaz, qui peut donner les mêmes effets avec facilité. Il résulte, en effet, d'expériences de M. E. Becquerel, que l'arc fourni par une pile à charbon de 60 couples, occasionne une dépense de 3 fr. par heure ; tandis qu'un éclairage égal produit le gaz, ne coûte que 0 fr. 80 c. L'éclairage à l'huile coûterait à peu près autant que l'éclairage électrique [1]. On s'occupe, du reste, de résoudre la question d'économie au moyen des *appareils d'induction*.

[1] Cosmos, *Revue des progrès des sciences*, t. X, p. 417.

III. Effets mécaniques produits par les courants.

1539. Changements de structure des métaux. — Le passage d'un courant peut modifier la structure de certains métaux, soit d'une manière permanente, soit momentanément. Le premier effet se remarque surtout sur le cuivre : on a souvent constaté que les réophores de la pile deviennent très cassants à leurs extrémités au bout d'un certain temps. M. Dufour a reconnu que le passage prolongé du courant d'un seul couple dans un fil de cuivre, peut diminuer sa ténacité de plus d'un quart. M. Wertheim, dans ses recherches sur l'élasticité (I, 446), a cherché quelle pourrait être l'influence du passage d'un courant, sur un fil métallique [1]. Il a reconnu, soit par la méthode des allongements, soit par la méthode des vibrations longitudinales, que le coefficient d'élasticité diminue légèrement pendant le passage du courant, et que la diminution qui est d'autant plus prononcée que le courant est plus intense, disparaît en même temps que le courant, quelque longue qu'ait été la durée de son passage. On ne peut attribuer la diminution de l'élasticité, à l'échauffement du fil, car on sait qu'il faut un échauffement considérable pour la diminuer sensiblement; de plus, quand on emploie la méthode des vibrations, le son remonte subitement dès qu'on supprime le courant. La ténacité est aussi un peu diminuée pendant le passage du courant ; mais ici il n'est guère possible de décider si c'est à son action propre ou à l'échauffement, qu'il faut attribuer ce résultat. Il est probable que la résistance du fil à l'électricité, a une certaine influence sur les modifications que le courant produit dans ses propriétés physiques, mais cette influence n'a pas encore été démêlée.

1540. Transport des liquides. — Le premier fait d'un transport de liquide, de toutes pièces, sous l'influence d'un courant, a été observé par M. Porret [2] ayant divisé un vase de verre en deux compartiments, au moyen d'une membrane de vessie, il remplit d'eau l'un des compartiments, et y plongea l'électrode positif d'une pile à auge de 80 couples. Il mit aussi un peu d'eau du côté opposé, et y plongea l'électrode négatif. Il vit l'eau baisser peu à peu du côté positif, et s'élever du côté négatif, de manière que le niveau s'y trouva bientôt plus élevé que dans le compartiment positif. D'autres liquides donnèrent les mêmes résultats ; toujours le transport se fit, à travers la cloison, dans le sens de la propagation du fluide positif. Il faut que le liquide oppose une certaine résistance au passage du courant ; ainsi, M. de La Rive a constaté que l'acide sulfurique étendu, qui est bon conducteur, n'est pas transporté en quantité appréciable.

M. Becquerel a produit un transport de liquide, dans les conditions suivantes :

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XII, p. 610.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. II, p. 137.

deux tubes contenant de l'eau et de l'argile délayée retenue par un morceau de gaze, sont plongés verticalement dans un vase rempli d'eau un peu salée. Ces tubes reçoivent les électrodes d'une pile à auge de 60 couples ; aussitôt on voit l'argile entraînée, troubler l'eau au-dessous du tube par lequel entre l'électricité positive.

1541. Lois du transport des liquides. — Ces lois ont été trouvées par M. Wiedemann[1] au moyen de l'appareil (*fig.* 1125). Le liquide est renfermé dans un vase VV, et dans un cylindre d'argile poreuse *a*, sur lequel est mastiquée une cloche de verre *c*, surmontée d'un tube *t*. Le vase poreux *a* est entouré d'un manchon *p*, communiquant en *o'* avec l'électrode positif d'une pile de Daniell. Un second manchon en platine est renfermé dans l'intérieur du vase poreux ; il communique avec l'électrode négatif de la pile, au moyen d'une tige *o*, qui traverse la paroi de la cloche *c* par une ouverture garnie de mastic. Quand le courant passe, le liquide monte dans l'intérieur du tube *ct* et s'écoule par le tube *l* dans le flacon *f*. Après s'être assuré qu'une différence de pression était incapable de faire passer le liquide à travers le vase poreux, M. Wiedemann a reconnu que :

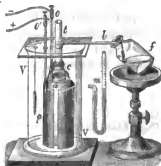


Fig. 1144.

1° *Les quantités de liquide transportées dans des temps égaux sont proportionnelles aux intensités des courants ; 2° elles sont indépendantes de l'épaisseur et de la surface du vase poreux.* On modifiait l'épaisseur des parois en enlevant de la matière par le grattage ; et l'étendue de la surface, en la recouvrant en partie d'un enduit imperméable. En opérant avec des liquides différents, on a reconnu, comme J. Napier l'avait déjà fait, que la quantité transportée augmente avec la résistance du liquide.

Les résultats des expériences qui précèdent doivent dépendre du frottement qu'éprouvent les liquides dans leur passage à travers les pores du diaphragme. M. Wiedemann a employé une autre méthode qui est indépendante de cette influence : il a fermé le tube *t*, a adapté un manomètre à mercure *m* à l'extrémité du tube *l*, et il a mesuré l'énergie d'action du courant, par la différence de hauteur des colonnes de mercure au moment où cette différence ne variait plus. Il est évident que les expériences ne pouvaient être faites, par ce moyen, que sur les liquides qui ne dégagent pas de gaz en se décomposant ; aussi, ont-elles été faites principalement avec des dissolutions diversement concentrées de sulfate de cuivre. Elles ont conduit aux lois suivantes : la force de transport du courant est mesurée par une pression 1° proportionnelle à son

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXXVII, p. 242.

intensité; 2° proportionnelle à la résistance du liquide; 3° proportionnelle à l'épaisseur du vase poreux; 4° la pression est en raison inverse de la surface du vase. Les deux dernières lois ne sont pas en contradiction avec les résultats trouvés par l'autre méthode, si l'on tient compte des lois de l'écoulement des liquides par les tubes capillaires (1,262). En effet, la résistance r qu'opposent ces sortes de tubes au passage des liquides est proportionnelle à leur longueur, puisque la vitesse d'écoulement est en raison inverse de cette longueur, qui est, ici, représentée par l'épaisseur. On a donc $r = ne$, e étant l'épaisseur, et n une constante qui dépend de la nature du vase poreux et de l'étendue de sa surface. La force qui fait équilibre à l'action du courant est donc égale à la pression h indiquée par le manomètre, multipliée par la résistance ne, c'est-à-dire à $b . n e$. On voit donc qne, pour un même courant, h doit être en raison inverse de e. Quant à l'influence de la surface du vase poreux, on voit que la valeur de h doit être d'autant plus grande, que les pores, plus nombreux, donnent un plus libre passage au liquide.

Il est bon de rappeler ici les phénomènes de transports produits par le courant des machines *hydro-électriques*, et dont nous avons fait mention à propos de l'explication des trombes (1398). Nous allons voir, en outre, en étudiant les décompositions électro-chimiques, d'autres phénomènes de transport, qui les accompagnent habituellement.

§ 3. — EFFETS CHIMIQUES DES COURANTS. — ELECTRO-CHIMIE.

1542. Les actions chimiques que produisent les courants électriques consistent principalement dans des décompositions. L'étude de ces actions forme l'*électro-chimie*. On peut regarder comme se rattachant à cette science, les détails que nous avons donnés sur les sources chimiques de l'électricité (p. 316), et sur la théorie chimique de la pile. L'électro-chimie, dont les premières notions ne remontent qu'à l'année 1800, a fait des progrès tellement rapides qu'elle constitue aujourd'hui une science très vaste, qui éclaire et féconde plusieurs théories de la chimie, et qui a déjà fourni à l'industrie diverses applications importantes. La première décomposition électro-chimique réalisée, est celle de l'eau. Nous avons dit (1438) dans quelles circonstances elle a été faite, par Carlisle et Nickolson. Cruickshank, peu de temps après, décomposa quelques sels, et W. Henry, différents acides [1]. En 1803, Hisinger et Berzélius établirent complètement l'existence du transport qui se fait aux deux pôles de la pile, des éléments séparés dans les décompositions. En 1806, eurent lieu les premières expériences de Davy, qui imprimèrent un si rapide élan à la Chimie Enfin, M. Faraday, vers 1832, découvrit les lois des décompositions électro-chimiques.

[1] *Bibliothèque britannique*, (Sciences et arts), t. XV, p. 11 et 38.

C'est à cet illustre physicien que sont dûs la plupart des termes dont on fait usage dans l'électro-chimie. Nous avons déjà dit (1438) que l'on désigne par le mot *électrolyte*, toute substance décomposable directement par le courant, et dont les éléments sont mis en liberté et séparés les uns des autres, comme cela a lieu dans la décomposition de l'eau. Si la substance n'est décomposée que *secondairement* par la réaction des éléments d'une autre substance décomposée par le courant, la première n'est pas un électrolyte. Par exemple l'acide nitrique traversé par un courant paraît se séparer en oxygène et en gaz nitreux, mais il est probable que cette décomposition n'est pas produite directement par le courant, et que l'eau étant d'abord décomposée, son oxygène se rend au pôle positif, et son hydrogène au pôle négatif, où, réagissant sur l'acide nitrique, il lui enléve de l'oxygène et le fait passer ainsi à l'état de gaz nitreux. L'acide nitrique ne serait pas alors un électrolyte. M. Faraday appelle *électrolycales* les substances qui ne se décomposent ainsi que par suite deréactions secondaires. Du mot *électrolyte* dérivent plusieurs termes dont il est facile de comprendre le sens : *électrolyser* signifie décomposer par le courant; *électrolysation* ou *électrolyse*, l'action d'électrolyser, etc. M. Faraday désignesous le nom d'*électrode* tout point par lequel le courant entre ou pénètre dans un corps, et par conséquent les extrémités des réophores de la pile [1].

I. Décompositions produite par les courants.

1543. Les décompositions produites par les courants dépendent, comme nous l'avons déjà dit (1438), du nombre et de la grandeur des éléments de la pile. Pour que la décomposition ait lieu, il faut évidemment que le courant puisse se propager à travers le corps à décomposer. Cette propagation est singuliérement facilitée par le fait même de la décomposition ; de sorte que, si les affinités à vaincre pour séparer les éléments ne sont pas trop énergiques, le courant peut passer, quoique le corps soit peu conducteur ; mais on facilitera ce passage en augmentant la conductibilité. Si le corps est mauvais conducteur et difficile à décomposer, le courant ne passera pas, à moins qu'il n'ait une forte tension. Il faut donc, pour chaque *électrolyte* placé dans des conditions déterminées, réunir un certain nombre de couples pour que la décomposition s'effectue. Une fois qu'on a rempli cette condition, l'expérience montre que la décomposition se fait d'autant plus rapidement, que les couples présentent une plus grande surface, c'est-à-dire qu'on fournit une plus grande quantité

[1] M. Faraday a aussi désigné sous le nom de *cathode* l'électrode négatif, et sous le nom d'*anode*, l'électrode positif ; il a appelé *ions*, les éléments séparés par l'électrolysation ; *cathions*, ceux qui se dégagent au pôle négatif, et *anions*, ceux qui se portent au pôle positif ; mais ces termes n'ont pas été généralement adoptés. Remarquons aussi que plusieurs physiciens donnent au mot *électrode* le genre féminin.

d'électricité (1453). Cela posé, nous allons passer en revue les principales décompositions que l'on peut produire.

1544. Décomposition de l'eau et autres oxydes. — Nous avons déjà décrit l'appareil connu sous le nom de *voltamètre* (*fig.* 1145), au moyen duquel on effectue la décomposition de l'eau; on lui donne des formes très variées. L'hydrogène et l'oxygène se dégagent séparément sur les lames ou fils de platine qui servent d'électrodes ; le premier se rend au pôle négatif, le second au pôle positif, où ils sont recueillis séparément dans de petites éprouvettes. L'eau distillée peut être ainsi décomposée, mais il faut employer un grand nombre de couples, à cause de son imparfaite conductibilité. Quelques couples suffisent quand on y mêle un peu d'acide sulfurique, d'acide phosphorique, ou de sulfate de potasse ; substances qui la rendent conductrice, et qui ne sont pas décomposées quand elles sont en très petites quantités. Gay-Lussac et Thénard ont reconnu que la décomposition est d'autant plus rapide, qu'il y a plus de substance dissoute. La chaleur, qui augmente la conductibilité de l'eau, favorise aussi sa décomposition. Les gaz recueillis sont dans les proportions de 1 volume d'oxygène contre 2 d'hydrogène. Cependant, quand l'opération dure longtemps, ces proportions peuvent être altérées ; il manque le plus souvent un peu d'oxygène. Cela provient de la combinaison avec l'eau, de ce gaz à l'état naissant, qui forme avec elle du bioxyde d'hydrogène ou *eau oxygénée*. L'hydrogène peut être ensuite en partie absorbé par l'oxygène de l'eau oxygénée, qui arrive jusqu'à lui en se répandant dans le liquide.

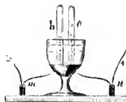


Fig. 1145.

Oxydes alcalins, — La décomposition des alcalis est une des plus belles découvertes de Davy [1]. Après avoir essayé vainement de décomposer la potasse en dissolution dans l'eau, au moyen d'une pile de 250 couples, il opéra sur cette substance sèche, après l'avoir rendue conductrice, en la fondant par l'action du feu dans une cuiller en platine fixée au pôle positif; il vit apparaître au pôle négatif, terminé par un fil en platine avec lequel il touchait la masse en fusion, une flamme jaune qu'il attribua à une matière combustible dégagée de la potasse. N'ayant pu recueillir cette matière, il eut l'heureuse idée d'opérer sur un fragment de potasse rendu conducteur par l'humidité. Ce fragment *ab* (*fig.* 1146) ayant été posé sur une lame isolée en platine *cd* fixée au pôle positif d'une pile de 250 couples, il vit apparaître au pôle négatif des globules d'un brillant métallique, dont la plupart brûlaient avec explosion, tandis que quelques-uns se conservaient, mais se recouvraient rapidement

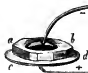


Fig. 1146.

[1] *Bibliothèque britannique* (Sciences et arts). t. XXXIX, p. 3

d'une couche blanche, en s'oxydant au contact de l'air. D'autres expériences, faites dans des tubes fermés, lui ont prouvé qu'il se dégage de l'oxygène au pôle positif. Davy reconnut dans les globules qui se rendent au pôle négatif, un métal particulier auquel il a donné le nom de *potassium ;* métal mou comme la cire, plus léger que l'eau, et ayant la propriété de la décomposer à la température ordinaire. Le Dr Seebeck obtient le potassium à l'abri du contact de l'air, par un moyen qui permet en outre d'opérer avec une pile beaucoup moins forte : on creuse dans le fragment de potasse *ab* (*fig.* 1146) une cavité que l'on remplit de mercure, dans lequel on enfonce le fil négatif de la pile. Le potassium prend naissance au milieu du mercure, et forme avec lui un amalgame, que l'on distille ensuite à l'abri de l'air, dans les vapeurs d'huile de naphte, pour vaporiser le mercure. Si l'on remplit la cavité d'huile de naphte, le potassium apparaît, sous forme de globules, dans ce liquide qui le préserve de l'oxydation ; mais il faut alors une pile très forte, par exemple de 20 à 30 couples à charbon.

Les expériences de Davy et de quelques autres chimistes ont montré que les autres alcalis fixes et les substances désignées sous le nom de *terres*, ne sont aussi que des oxydes de certains métaux, qu'on est parvenu à isoler depuis, par des méthodes purement chimiques. Nous citerons en particulier le métal de l'alumine, l'*aluminium*, que M. Deville est parvenu à obtenir en grandes masses, et qui, peu altérable, léger, très résistant, constitue une substance précieuse pour les arts et l'industrie.

Les oxydes anhydres, comme l'oxyde de zinc, les oxydes de cuivre, l'oxyde d'argent..., qui ne sont pas conducteurs, ne peuvent être décomposés à l'état solide ; alors on les dissout dans l'ammoniaque, ou bien on les fond par la chaleur, ce qui les rend le plus souvent bons conducteurs.

De l'ammonium. — Après que Davy eut découvert que les alcalis fixes sont des oxydes, il chercha, mais en vain, à découvrir l'oxygène, dans l'alcali volatil ou ammoniaque. Depuis, Berzelius et Pontin, Seebeck, Trommsdorf,.... on fait des expériences très curieuses, d'après lesquelles on a supposé l'existence, dans ce composé, d'un radical analogue aux métaux des alcalis fixes. Voici une des manières d'opérer : on remplit de mercure une cavité pratiquée dans un morceau de sel ammoniac humide communiquant avec le pôle positif d'une pile ; on plonge dans le mercure une pointe de platine apportant le fluide négatif. On voit bientôt le mercure se gonfler et acquérir un volume 5 à 6 fois plus grand, en prenant une consistance pâteuse. Berzélius a admis qu'il s'est formé un amalgame d'un métal qu'il a nommé *ammonium*, et qui entrerait dans la composition de l'ammoniaque. Les chimistes se sont beaucoup occupés des propriétés de cet amalgame, et il s'est élevé parmi eux de longues discussions, relativement à l'existence de l'ammonium.

1545. Acides et composés binaires non oxygénés. — Quand un acide oxygéné est décomposé par un courant, l'oxygène se dégage toujours au pôle positif, et la substance unie à ce gaz se dépose au pôle négatif. Par

exemple, l'acide phosphorique humide, l'acide sulfurique hydraté, donnent du phosphore et du soufre au pôle négatif. On peut expliquer ce résultat, soit par une décomposition directe, soit par un effet secondaire. Dans ce dernier cas, l'eau serait d'abord décomposée, son oxygène se dégagerait au pôle positif, et son hydrogène s'emparant de l'oxygène de l'acide au pôle négatif, y déposerait le radical de l'acide. La décomposition d'oxydes anhydres à l'état de fusion montre que l'intervention de l'eau n'est pas nécessaire ; cependant elle peut jouer un rôle en certains cas, comme cela a lieu très probablement dans la décomposition de l'acide nitrique, comme nous l'avons déjà expliqué plus haut (1542).

Les acides hydrogénés, comme les acides chlorhydrique, bromhydrique, sulfhydrique..., sont décomposés directement : l'hydrogène se rend toujours au pôle négatif, et la substance à laquelle il est uni, au pôle positif. On peut opérer soit dans un voltamètre, soit dans un tube en U, dont les extrémités bouchées sont munies de tubes recourbés pour recueillir les gaz.

Les composés binaires métalliques, comme les chlorures, sulfures..., en dissolution dans l'eau, sont décomposés directement : le métal se porte au pôle négatif, comme dans la décomposition des oxydes métalliques (1544). Quand le métal est capable d'agir sur l'eau à froid, comme le potassium, la décomposition est suivie d'une action secondaire : Au pôle négatif, l'eau est décomposée par le métal qui s'empare de son oxygène pour former un oxyde, et l'hydrogène se dégage. Les iodures sont surtout facilement décomposables : si l'on trempe dans une dissolution d'*iodure de potassium*, une bande de papier enduite d'amidon, un seul couple suffit pour qu'on voie apparaître au pôle positif, une tache bleue provenant de l'action de l'iode sur l'amidon. — Quand la substance est insoluble, on la fond par le feu; si elle est alors conductrice, la décomposition a lieu.

Citons encore l'ammoniaque, qui donne lieu à des *effets secondaires* : l'hydrogène se porte au pôle négatif, et l'azote au pôle positif; là, il rencontre l'oxygène de l'eau, qui est aussi décomposée, forme avec lui de l'acide azotique, qui, s'unissant à l'ammoniaque, produit de l'azotate d'ammoniaque.

On voit, en résumé, que, dans l'électrolyse des composés binaires, l'oxygène se rend toujours au pôle positif, l'hydrogène et les métaux au pôle négatif. Quant aux composés qui ne renferment ni oxygène, ni hydrogène, ni métaux, le pôle auquel se rend chaque élément dépend de la substance à laquelle il est uni. Par exemple, le chlore se rend au pôle négatif dans la décomposition de l'acide chlorique, et au pôle positif, dans celle de l'acide chlorhydrique.

1546. — Décomposition des sels oxygénés. — Si l'on met dans un tube en U, une dissolution d'un sel contenant un métal incapable de décomposer l'eau à la température ordinaire, le sel est décomposé, l'acide se porte au pôle positif, avec l'oxygène de la base, qui elle-même éprouve la décomposition, et le métal se dépose au pôle négatif. C'est ce qui arrive, par exemple, pour le sulfate de cuivre, l'azotate d'argent. Quand le courant est très énergique,

l'acide lui-même peut être décomposé ; son oxygène se dégage au pôle positif, et la substance à laquelle il est uni, au pôle négatif.

Quand le métal du sel est susceptible de décomposer l'eau, on trouve au pôle négatif, la base du sel décomposé, et il y a en même temps dégagement d'oxygène et d'hydrogène qui se rendent aux pôles. C'est ce qui a lieu avec le sulfate de potasse, comme nous l'avons expliqué plus haut (1348), et nous avons vu comment on peut, avec la teinture de violette, prouver la présence de l'acide et de la base autour des électrodes. Mais, ici, on peut expliquer le résultat de deux manières : 1° on peut supposer que l'acide et la base sont simplement séparés, et que leur séparation est accompagnée de la décomposition d'un peu d'eau; 2° on peut admettre que les choses se passent d'abord comme avec le sulfate de cuivre; mais que le potassium, d'abord mis en liberté au pôle négatif, décompose l'eau, en formant de la potasse, et dégageant l'hydrogène qu'on trouve au pôle négatif avec la potasse formée. A l'appui de cette dernière explication, on a fait remarquer que, si l'on prend pour électrode négatif, du mercure renfermé dans un tube recourbé *ac* (*fig.* 1147), le potassium s'amalgame avec la surface du mercure, au moins en partie, et échappe ainsi à l'action de l'eau. Les métaux qui décomposent l'eau à la chaleur rouge, comme le fer, le cobalt, le nickel, le zinc, peuvent aussi former un peu d'oxyde, après s'être déposés à l'électrode négatif, et alors il y a dégagement d'un peu d'hydrogène. Nous verrons, du reste, en parlant des lois de l'électrolyse, d'autres motifs puissants de préférer la seconde explication à la première (1565).

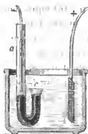


Fig. 1047.

Quand le métal du sel est susceptible de former plusieurs oxydes, on peut trouver au pôle positif un oxyde plus oxygéné que la base, formé aux dépens de l'oxygène de cette dernière, dont une partie seulement se dégage. C'est ce qui a lieu pour l'azotate d'argent, avec lequel il se dépose une couche de bioxyde d'argent sur l'électrode positif; pour l'acétate de plomb, avec lequel cet électrode se recouvre d'une couche brune d'acide plombique, pendant que l'électrode négatif reçoit des cristaux de plomb.

Enfin, quand on se sert de piles énergiques, il peut y avoir décomposition de sels engagés dans des masses solides, d'où l'on ne les croirait pas susceptibles d'être séparés. C'est ainsi que plusieurs physiciens, en décomposant l'eau dans des tubes de verre, avaient trouvé un acide au pôle positif et un alcali au pôle négatif, et avaient pensé que ces substances entraient dans la composition de l'eau; mais Davy, après avoir opéré dans des vases de différentes substances, verre, marbre, agate, cire, or..., reconnut que l'alcali et l'acide provenaient du sel marin qui entre dans la composition du verre, sel qui en se décomposant donnait de l'acide chlorhydrique et de la soude.

1517. Décomposition des mélanges. — Quand plusieurs substances

sont mélangées dans une dissolution, leur électrolysation dépend des proportions dans lesquelles elles s'y trouvent. Ainsi, l'eau seule est décomposée quand elle est mêlée d'un peu d'acide sulfurique, et c'est ce dernier corps qui subit la décomposition quand il est en grande proportion. M. Becquerel a reconnu que, en général, lorsque les proportions ne diffèrent pas beaucoup, la substance la moins stable et la meilleure conductrice se décompose de préférence à l'autre[1]. Cependant, l'influence des masses se fait toujours sentir, comme il résulte de l'expérience suivante : on dissout dans 100 équivalents d'eau, 1 équivalent d'azotate d'argent, puis successivement 2, 4, 8, 16, 32, 64 équivalents d'azotate de cuivre ; l'azotate d'argent est d'abord seul décomposé, et l'azotate de cuivre ne commence à l'être que lorsqu'il y en a plus de 60 équivalents dans la dissolution ; alors les deux métaux se déposent en même temps au pôle négatif. Il s'en dépose le même nombre d'équivalents, quand la dissolution contient 67 équivalents d'azotate de cuivre ; et le double d'équivalents de cuivre, quand il y a 87 équivalents de sel de cuivre, contre 1 d'azotate d'argent.

1548. Substances organiques. — Les courants peuvent, en certains cas, séparer les principes immédiats des plantes : Davy ayant fait passer le courant d'une pile de 150 couples à travers une feuille de laurier, trouva, au bout de quelques jours, de l'acide cyanhydrique au pôle positif, et un mélange de chaux, résine et matière verte, au pôle négatif. La feuille était desséchée et comme grillée. Une tige de menthe tenant à la plante, et avec laquelle il faisait communiquer deux vases pleins d'eau distillée recevant les électrodes de la pile, donna, de même, un acide dans le vase positif, et de la potasse et de la chaux dans le vase négatif, MM. Couerbe et Peltier, ayant fait passer le courant d'une forte pile à travers une dissolution d'opium, ont obtenu de la morphine en petites masses floconneuses au pôle négatif, et une substance jaunâtre ayant tous les caractères de l'acide méconique, au pôle positif. On conclut de là que la morphine existe toute formée dans l'opium ; ce dont on avait pu douter, parce qu'on l'extrait en faisant agir des alcalis minéraux [2].

L'alcool absolu n'est décomposé que par les piles très fortes, parce qu'il est mauvais conducteur. L'eau, qui entre dans sa composition, est électrolysée ; l'hydrogène se dégage au pôle négatif, et l'oxygène forme des produits secondaires au pôle positif. En même temps on sent une odeur d'éther, qui n'est que de l'alcool privé d'un équivalent d'eau ; et, de plus, un voltamètre introduit dans le même circuit, donne la même quantité d'hydrogène que l'alcool. Un peu de potasse mêlée à ce liquide le rend conducteur, et il se décompose plus facilement : M. Connel, avec 60 couples, a obtenu de l'hydrogène au pôle négatif, et au pôle positif une matière résineuse qui colorait le liquide en rouge ; en même temps il se déposait du carbonate de potasse. L'esprit de bois donne

[1] *Traité d'électricité et de magnétisme*, par MM. Becquerel père et fils, t. II, p. 41.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LIV, p. 188.

des résultats analogues, seulement il faut une pile plus énergique. L'éther résiste à la décomposition, même quand on essaie d'y mêler de la potasse [1].

Substances animales. — Un morceau de chair musculaire soumis pendant plusieurs jours au courant d'une forte pile, est privé de tous ses sels; ses extrémités étant plongées dans des vases pleins d'eau distillée, on trouve dans le vase négatif, des alcalis, potasse, soude, chaux, ammoniaque; et dans le vase positif, des acides sulfurique, phosphorique, chlorhydrique et azotique. Le morceau de chair devient sec et dur, et si on le brûle on ne trouve aucune trace de matières salines dans le résidu. Les substances vivantes semblent éprouver les mêmes effets. Davy ayant établi la communication entre les deux vases, au moyen des doigts bien lavés dans l'eau distillée, trouva des acides dans le vase positif, et des alcalis dans le vase négatif.

1549. Electrolyse par l'étincelle de la pile. — Nous avons vu que les décharges lumineuses de l'électricité sont capables de produire des décompositions chimiques (1340); et que dans ce cas les substances restent mélangées. Elles peuvent aussi décomposer les substances isolantes, comme l'éther, les huiles grasses, les huiles essentielles, comme l'a constaté Morgan, un des premiers. Les étincelles produites par l'électricité des piles à forte tension, produisent les mêmes effets : M. Melly [2], en faisant passer des étincelles entre deux fils très rapprochés engagés dans un tube rempli successivement de divers liquides, a pu les décomposer; il lui suffisait d'ouvrir et de fermer rapidement le circuit pour obtenir des étincelles très rapprochées. Il put ainsi, avec une pile de 5 à 6 couples de Grove, décomposer l'huile d'olive, l'essence de térébenthine, l'éther sulfurique, l'alcool absolu, l'alcool à 36°, le naphte, le sulfure de carbone, le chlorure de soufre; substances que le courant continu de la pile qu'il employait ne pouvait décomposer. Mais il ne put décomposer l'eau pure qu'en employant des fils de cuivre ou des pointes de charbon, dont les molécules ajoutaient leur affinité pour l'oxygène à l'action décomposante de l'électricité, et donnaient lieu à la formation d'oxyde de cuivre ou d'acide carbonique. Davy, en faisant jaillir l'arc voltaïque dans différents liquides mauvais conducteurs, a pu aussi les décomposer. Mais dans tous les cas, les éléments séparés restaient mélangés. Cela se voit surtout nettement quand on opère avec les appareils d'induction, qui permettent d'obtenir de fortes étincelles très rapprochées. M. Grove ayant décomposé, avec l'appareil de Ruhmkorff, de l'eau pure ou légèrement acide, a recueilli les gaz mélangés. L'électricité arrivait dans l'eau par des fils de platine scellés aux extrémités de tubes de verre, comme dans la *fig.* 1012, seulement ils ne dépassaient pas la surface du verre dans l'intérieur des tubes, où l'on trouvait le mélange gazeux. On a conclu de ces faits, que la décharge lumineuse agit par la grande élévation de température qu'elle produit. En effet, M. Grove a pu, au moyen du

[1] *Archives de l'électricité*, de M. A. de La Rive, t. I, p. 401.
[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XIX, p. 253.

platine incandescent, produire des décompositions semblables à celles que produit l'électricité quand il n'y a pas transport des éléments[1]. Il est parvenu à décomposer, par la chaleur seule, des gaz que décompose une série d'étincelles électriques. Il a pu même décomposer l'eau; par exemple, en plongeant dans ce liquide un globule de platine, fondu au bout d'un gros fil par la flamme d'un chalumeau; il se dégage une petite bulle gazeuse, qui est un mélange d'oxygéne et d'hydrogéne.

1550. Circonstances qui influent sur les décompositions électrolytiques. — Tout ce qui augmente la conductibilité favorise l'électrolysation. La chaleur rend la décomposition de l'eau et des dissolutions beaucoup plus facile et beaucoup plus rapide, en accroissant leur pouvoir conducteur. L'acide sulfurique concentré n'est pas décomposé; l'eau pure l'est à peine avec de très fortes piles, et même certains physiciens pensent que ce résultat est dû à l'air qu'elle tient en dissolution, ou à des traces de matières salines ou alcalines qu'elle contient aprés sa distillation dans des vases de verre; mais si l'on mélange l'acide sulfurique avec l'eau, celle de ces substances qui est en très grande proportion par rapport à l'autre se décompose, parce que le liquide est alors bon conducteur.

Etat physique. — Les composés *secs* sont en général de très mauvais conducteurs ; mais, à l'état de fusion ignée, beaucoup sont conducteurs et peuvent alors être électrolysés. Par exemple, M. Faraday a reconnu qu'une mince couche de glace suffit pour intercepter le courant d'une pile puissante capable de décomposer l'eau. Une foule de substances lui ont présenté la même particularité[2]; la substance était desséchée et fondue dans une capsule de platine fixée à l'un des pôles de la pile ; quand elle était peu fusible, on la fondait, au chalumeau, sur un petit anneau en platine, auquel elle restait adhérente. Une pointe de platine fixée à l'électrode opposé était plongée dans la masse en fusion ; alors le courant passait, et la décomposition avait lieu. Mais dés que la pointe de platine était enveloppée d'une couche solidifiée, l'action cessait et le courant était intercepté, comme l'indiquait un réomètre placé dans le circuit.

Parmi les substances sur lesquelles M. Faraday a constaté ce résultat, nous citerons les suivantes : divers *oxydes*, potasse, protoxyde de plomb, verre d'antimoine, protoxyde d'antimoine, oxyde de bismuth. — Les *chlorures* de potassium, de sodium, de baryum, de strontium, de calcium, de magnésium, de manganèse, de zinc, de plomb, d'antimoine, d'argent, et les protochlorures de cuivre et d'étain ; — les *iodures* de potassium, de zinc et de plomb, le proto-iodure d'étain, le périodure de mercure ; — le *fluorure* de potassium, auquel M. Beetz a ajouté le fluorure de plomb ; — le *cyanure* et le sulfo-cyanure de potassium ; — le *sulfure* de potassium, obtenu par la réduction du sulfate de potasse par l'hydrogéne ; le sulfure ordinaire de potassium. — Parmi les *sels*, le

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXI, p. 134.

[2] *Bibliothèque universelle de Genève* (Sciences et arts), t. LV (1834), p. 20.

chlorate de potasse ; les azotates de potasse, soude, baryte, strontiane, plomb, cuivre, argent ; les sulfates de soude, de plomb ; le proto-sulfate de mercure ; les phosphates de potasse, plomb, cuivre, le phosphate acide de chaux ; les carbonates de potasse et de soude ; le borax, le borate de plomb, le perborate d'étain, le bi-chromate de potasse, le chromate de potasse ; l'acétate de potasse ; le silicate de potasse ; le caméléon minéral.

La conductibilité des corps qui se ramollissent peu à peu augmente quelquefois graduellement comme leur fluidité ; il semble donc que cette propriété dépend de la mobilité des molécules. Cependant il y a des corps qui deviennent conducteurs à une haute température sans devenir liquides. Par exemple, M. Faraday, M. Buff, M. Beetz, ont trouvé que différentes espèces de verre conduisent et sont électrolysables à une température très élevée inférieure à celle de leur fusion. M. Hittorff a fait une observation analogue sur le sulfure d'argent et le sous-sulfure de cuivre. D'un autre côté, la fusion ne rend pas conductrices certaines substances en assez grand nombre, parmi lesquelles nous citerons, d'après M. Faraday, le soufre, le phosphore ; l'iodure de soufre, l'orpiment, le réalgar ; les acides margarique et oléique, la stéarine ; le camphre artificiel, le sucre, le spermaceti, la résine, la gomme arabique ; le perchlorure d'étain, l'acide borique. — Il y a même des composés liquides comme le perchlorure d'antimoine, le bichlorure d'étain, les huiles grasses, les huiles essentielles, l'éther, qui ne sont pas conducteurs et ne sont pas électrolysables. On remarque que ces composés ont une formule chimique assez compliquée.

Substances mélangées. — L'affinité chimique des substances mélangées à l'électrolyte, pour les éléments qu'il contient, peut aider à sa décomposition, en provoquant des actions secondaires, comme l'a constaté, le premier, M. Faraday. M. Grove a reconnu que la présence de l'oxygène ou de l'hydrogène dissous dans l'eau en favorise l'électrolyse. M. E. Becquerel[1] a vu un seul couple de Wollaston incapable de décomposer l'eau acidulée, la décomposer quand on y mêle du chlore, qui agit par son affinité pour l'hydrogène, qu'il absorbe à mesure qu'il se dégage[2], ou quand on y mêle du sulfate de protoxyde de fer, qui tend à se combiner avec l'oxygène. Le même physicien a comparé les affinités de différents corps pour l'hydrogène et l'oxygène, au moyen des quantités de ces gaz absorbées dans différents voltamètres placés dans le même circuit, et dont l'eau contenait du chlore, du brome, de l'iode, ou un peu d'acide sulfurique. Il opérait avec 10 à 20 couples de Wollaston, et il y avait de l'oxygène absorbé en même temps que de l'hydrogène. En retranchant des volumes de gaz dégagés dans l'eau acidulée, les volumes recueillis dans chacun des autres liquides, il connaissait les quantités d'hydrogène et d'oxygène absorbées. Il a reconnu ainsi que les trois substances doivent être placées rela-

[1] *Archives de l'électricité*, de M. A. de La Rive, t. I, p. 381.

[2] Si l'on emploie plusieurs couples, l'hydrogène se dégage trop vite pour être absorbé entièrement par le chlore, qui n'arrive pas assez vite au pôle négatif.

tivement à leur affinité pour l'hydrogène, dans l'ordre : *chlore*, *brome*, *iode* ; et dans l'ordre inverse, quant à leur affinité pour l'oxygène ; ce qui est d'accord avec les données de la chimie.

1551. Influence des électrodes. — Electrode soluble. — Nous avons déjà vu qu'en formant l'électrode négatif avec un métal qui, comme le mercure, peut se combiner avec le métal de l'électrolyte, on favorise la décomposition (1544). Mais c'est surtout quand l'électrode positif est oxydable qu'il intervient dans l'électrolyse, par son affinité pour l'oxygène. C'est ainsi qu'un seul couple incapable de décomposer l'eau acidulée avec des électrodes en or ou en platine, la décompose quand l'électrode positif est formé d'un métal oxydable. Il suffit même, comme l'a constaté M. Schœnbein [1], que l'électrode positif soit recouvert d'une substance avide d'oxygène, par exemple qu'il ait été plongé préalablement dans du gaz hydrogène ; seulement l'action cesse au bout de peu de temps. Si l'on recouvre l'électrode négatif, d'une substance avide d'hydrogène, on arrive au même résultat : par exemple, si on le recouvre de peroxyde de plomb ou d'argent, d'oxyde de cuivre ou d'étain, d'acide nitrique concentré, et, en général, d'une substance cédant facilement son oxygène, on voit un dégagement d'oxygène au pôle positif, jusqu'à ce que la couche oxydante de la lame négative ait disparu. Des lames de cuivre, fer, palladium, plomb, etc., oxydées à leur surface en les chauffant convenablement, donnent des résultats semblables. Il en est encore de même avec des lames de platine plongées préalablement dans l'oxygène, dans le chlore ou dans le brome gazeux.

Quand l'électrode positif est de même nature que le métal d'une dissolution saline saturée, on obtient un résultat important par les applications qu'on en faites dans la *galvanoplastie* ; c'est que cet électrode, en se dissolvant dans l'acide qui se porte à sa surface, forme un sel qui remplace celui qui a été décomposé, de manière que la dissolution tend à conserver son état de saturation. L'électrode positif porte alors le nom d'*électrode soluble*. — Il est évident que la quantité de métal qui lui est enlevée doit être tout au plus égale à celle qui se dépose au pôle négatif. Or, il arrive quelquefois, notamment pour les sels de cuivre, qu'il y a un peu plus de métal enlevé au premier électrode. Ce fait, bien constaté par M. Jacobi, a été étudié par M. E. Becquerel [2], qui a reconnu que la dissolution de sulfate de cuivre acidulée ou de sulfate de cuivre du commerce, qui est toujours un peu acide, donne quelques centièmes de perte de plus au pôle positif, que de gain au pôle négatif. Avec le sulfate de cuivre pur, la différence n'est plus que de quelques millièmes ; et avec du sulfate bien neutre, il y a tantôt plus tantôt moins de perte, que de gain au pôle négatif. On voit donc que l'acide mêlé à la dissolution est la cause des différences observées. Or, comme nous le verrons plus loin (1572), lorsque la dissolution est acidulée, l'*électrolyse* du sel est accompagné d'une décomposition d'eau, dont l'oxygène

[1] *Archives de l'électricité*, de M. A. de La Rive, t. II, p. 241.

[2] *Traité d'électricité et de magnétisme*, par MM. Becquerel père et fils, t, II, p. 28.

à l'état naissant s'unit à du cuivre, pour former un oxyde qui s'unit à l'acide que contenait d'avance la dissolution. Cette perte de l'électrode positif s'ajoute à celle qui est occasionnée par l'acide abandonné par le sel.

II. Du transport des éléments aux électrodes.

1552. Transport des éléments à travers plusieurs dissolutions. — Une des circonstances les plus remarquables des décompositions électrolytiques, est l'apparition des éléments séparés, seulement à la surface des électrodes. Si l'on en trouve à une certaine distance de cette surface, c'est qu'ils se mélangent au liquide. Cette diffusion devient évidente quand on dispose des cloisons membraneuses auprès des électrodes; les substances mises en liberté ne les dépassent jamais. Berzélius et Hisinger ont les premiers appelé l'attention sur ce phénomène, mais c'est Davy qui en a montré toute l'importance au moyen d'expériences variées, et a fait voir qu'il peut se produire, même à travers une série de dissolutions placée dans des vases différents réunis par des conducteurs humides.



Fig. 1148.

Considérons trois vases *a*, *m*, *c* (*fig.* 1148) réunis deux à deux par une mèche d'amiante ou de coton imbibée d'eau A, ou par un tube en siphon T rempli d'eau ou d'argile humide. En *a* il y a une dissolution d'un sel neutre alcalin; en *c* et en *m* de l'eau distillée, et les liquides des trois vases sont colorés avec du sirop de violettes. Dès que le courant est établi, la base du sel apparaît à l'électrode négatif, autour duquel la liqueur se colore en vert; et l'acide, à l'électrode positif, où elle prend la couleur rouge. Le liquide de *m* ne change pas de couleur; cependant il a dû être traversé par l'acide se rendant dans le vase *c*, si le vase *a* reçoit l'électrode négatif, et par la base, si ce vase reçoit l'électrode positif.

Si l'on remplit la capsule *m* d'une dissolution de potasse, et que la dissolution saline soit dans le vase négatif, l'acide apparaîtra encore au pôle positif, après avoir traversé la potasse sans se combiner avec elle. Si, le sel étant dans le vase positif, on remplit le vase *m* avec un acide, la base apparaît de même en *c*, après avoir traversé cet acide. Il faut une pile assez forte et un temps assez long pour que ces effets se manifestent, à cause de la faible conductibilité de l'eau.

Quand l'acide et la base qui se rencontrent dans le vase *m* sont susceptibles de former un sel insoluble, ils se combinent en formant un précipité, et le vase *c* ne reçoit plus l'élément qui devait s'y rendre. Par exemple, s'il y a du

sulfate de potasse dans le vase négatif, une dissolution de baryte placée en *m* arrêtera l'acide sulfurique. De même, l'acide sulfurique placé en *m* arrêterait la baryte provenant de la décomposition d'un sel de baryte placé dans le vase positif. Si la capsule *m* contenait du sulfate de potasse, il s'y précipiterait du sulfate de baryte, et la potasse se montrerait à l'électrode négatif.

Électrodes liquides. — Quand une base est insoluble ou peu soluble dans l'eau, comme la magnésie, et que le vase moyen est rempli d'eau, cette base s'y arrête en se précipitant. M. Faraday a disposé l'expérience de la manière suivante : un vase V (*fig.* 1149) est partagé en deux par une cloison *c* qui ne va pas jusqu'au fond; on y verse une dissolution de sulfate de magnésie, en ayant soin de ne pas mouiller le vase et la cloison au-dessus du niveau, puis on verse en *e*, avec précaution, de l'eau distillée qui refoule la dissolution saline en *m*, et se trouve séparée de cette dissolution par une surface de contact *o*. Une lame de platine coudée *n* est étendue sur la surface de l'eau, et communique avec le pôle négatif de la pile; une autre lame *p*, plongée dans la dissolution, communique avec le pôle positif. On voit bientôt la magnésie se déposer à la surface de séparation *o*; l'eau joue ainsi le rôle d'électrode négatif. — On peut opérer plus facilement, en mettant simplement l'eau et la dissolution saline dans les deux branches d'un tube en U.



Fig. 1149.

Si, au lieu de conducteurs humides pour établir les communications, on se sert d'arcs métalliques, les extrémités de ces arcs servent d'électrodes et reçoivent dans chaque vase le dépôt des éléments séparés. Il n'y a que les conducteurs humides qui peuvent ne pas jouer le rôle d'électrodes; nous allons voir dans quelles conditions (1556).

1553. Applications à la médecine. — MM. Vergnès et A. Poey ont tiré parti du transport qui se fait à travers les tissus vivants, pour extraire du corps, même des os, les substances métalliques qui peuvent avoir été absorbées soit par la digestion, après l'usage de remèdes contenant des métaux, soit par absorption cutanée, soit par la respiration de vapeurs ou de poussières métalliques répandues dans l'air de certains ateliers. Le malade est placé dans une baignoire isolée, remplie d'eau acidulée et communiquant avec le pôle négatif d'une forte pile. Il repose sur un banc de bois, et tient dans sa main un cylindre en fer communiquant avec le pôle positif de la pile et entouré de linges mouillés, pour éviter les effets de la chaleur. Les métaux ne tardent pas à quitter les tissus et à venir se déposer sur les parois de la baignoire [1].

On peut aussi, au moyen d'un courant, introduire diverses substances dans la profondeur des organes. Supposons, par exemple, qu'il s'agisse de l'iode; on

[1] *Comptes-rendus de l'Acad. des sc.*, t. XL, p. 225, et *Bibl. de Genève* (Arch des sc.), t. XXVIII, p. 208.

applique sur la peau un linge mouillé avec une dissolution d'iodure de potassium, sur lequel on appuie une lame de platine communiquant avec le pôle positif de la pile. On fait communiquer le pôle négatif avec des aiguilles de platine introduites dans les tissus par le procédé de l'acupuncture, et au bout de quelque temps on peut reconnaître aux extrémités de ces aiguilles, la présence de l'iode qui a traversé les tissus.

1554. Théorie de Grotthuss. — Le phénomène de l'apparition des éléments aux électrodes a toujours excité à haut degré l'étonnement des physiciens. M. Biot a cherché à l'expliquer par un mouvement de transport direct des éléments, sollicités par les électricités contraires des électrodes. Mais, il est bien difficile de concevoir ce transport dans un grand nombre de cas. Grotthuss, dès 1805, a proposé une théorie très ingénieuse, qui permet de rendre compte des particularités nombreuses du phénomène, dont quelques-unes semblent, au premier abord, incompréhensibles [2]. Cette théorie s'appuie sur une hypothèse due à Davy, adoptée plus tard par Berzélius et par Ampère, et qui consiste à considérer les molécules réunies dans un composé, comme constituées dans des états électriques opposés. Considérons, par exemple, l'eau, et soit *ac* (*fig.* 1150) une file de molécules placée entre les électrodes de platine *p*, *p'*, et supposons

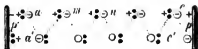


Fig. 1150.

que l'hydrogène, dont les molécules sont représentées par des points noirs, soit électrisé positivement, et que l'oxygène, dont la molécule est représentée par un cercle blanc, soit électrisé négativement. Les molécules d'eau obéissant aux actions des électricités accumulées sur les électrodes, vont se tourner comme l'indique la figure. L'hydrogène de chacune d'elles sera attiré par *p'* et repoussé par *p* du côté de *p'*. L'oxygène sera, de même, sollicité du côté de *p*. Si ces actions sont assez énergiques, l'hydrogène de la molécule *a* sera séparé de son oxygène et se dégagera au pôle *p'*. L'oxygène de cette molécule, repoussé par *p'*, rencontrera l'hydrogène de la molécule suivante *m*, et se combinera avec lui. De même l'oxygène séparé de *m* se combinera avec l'hydrogène de *n*, et ainsi de suite, de manière que l'oxygène de la molécule *c* se trouvera mis en liberté, et que la série *ac* prendra l'état indiqué en *a' c'*. Les choses se passeront de la même manière dans toutes les séries de molécules que l'on pourra imaginer entre les électrodes. Cette explication s'applique à tous les composés binaires. On voit qu'il n'y a pas là, réellement transport des éléments.

Dans le cas des sels, dont le métal apparaît seul au pôle négatif, l'action est plus compliquée, et les éléments de l'eau interviennent dans l'action chimique. Considérons une série AB de molécules d'un sel (*fig.* 1151); les triangles représentent les molécules d'acide, et les carrés les molécules de métal; les molécules d'oxygène et les molécules d'eau *e*, *e' e''* sont représentées comme dans

la figure précédente. La série AB prendra l'état indiqué en *ma*. Il se dégagera au pôle positif une molécule d'acide *a* et une molécule d'oxygène *o* venant de la base. La molécule *n* du métal s'unira à l'oxygène de la molécule d'eau *e*, pour former une nouvelle molécule de base, qui s'unira à la molécule d'acide *a'*; l'hydrogène de l'eau s'emparera de l'oxygène de la molécule de base unie à *a'*, et le métal mis en liberté ira se combiner avec l'oxygène de la molécule d'eau *e'*....., et ainsi de suite, de manière qu'il se déposera un atome de métal *m*, sans dégagement d'hydrogène, comme le montre l'expérience.



Fig 1151.

On voit pourquoi l'état de dissolution et de fusion favorisent la décomposition ; les molécules ayant alors une mobilité qui leur permet de se tourner et de s'orienter avec facilité, pour se prêter aux décompositions et recomposition successives qui accompagnent l'électrolyse.

Nous voyons maintenant pourquoi on donne le nom d'*électro-positifs* aux corps qui se dégagent au pôle négatif, et le nom d'*électro-négatifs* à ceux qui se dégagent au pôle positif (1438). L'hydrogène, les métaux, les bases, sont essentiellement électro-positifs, et l'oxygène et les acides sont électro-négatifs. Cependant, comme une même substance peut être tantôt électro-positive, tantôt électro-négative, suivant la nature de l'élément auquel elle est associée (1545), il faut admettre que l'état électrique des molécules dépend de la nature de ce second élément, ou bien que ces éléments sont constitués dans l'état électrique qui précède la décomposition, par l'influence même des électrodes qui les polarisent. Cette dernière manière de voir, adoptée par M. de La Rive, satisfait à toutes les conditions du phénomène.

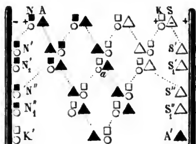


Fig. 1152.

1555. Cas de plusieurs dissolutions. — Nous avons supposé, dans ce qui précède, que le courant ne traversait qu'une seule dissolution, recevant les électrodes. Supposons maintenant que le courant en traverse plusieurs. Dans ce cas, il y a réellement *transport* de certains des éléments, mais toujours par une suite de décompositions et de recompositions successives. Considérons d'abord deux dissolutions; par exemple, du sulfate de potasse et de l'azotate de soude placés dans un tube en U, ou séparés par une cloison poreuse. Représentons, dans la série NS (*fig.* 1152), les molécules d'acide par des triangles, et les molécules de métal, par des carrés, les figures étant noires

pour l'acide azotique A et le sodium N, et blanches pour l'acide sulfurique S et le potassium K. Le petit cercle blanc représente la molécule d'oxygène qui entre dans chaque base. Une suite de décompositions et de recompositions successives mettra d'abord la série dans l'état indiqué en N'S' et il y aura une molécule d'acide sulfurique libre en S', et une molécule de soude en N'; en *a*, il se formera une molécule d'azotate de potasse. Les molécules de la série N'S' s'orienteront ensuite comme en $N_1'S_1'$ et cette série prendra ensuite l'état indiqué en N''S'', ou $N_1''S_1''$, et enfin l'état indiqué en K'A', où l'on voit, en A', une molécule libre d'acide azotique, et en K' une molécule libre de potasse. La série ne contient plus autant de molécules que dans le principe, mais des molécules du liquide ambiant viennent remplacer celles qui disparaissent, et combler les vides qu'elles laissent au milieu de la série, d'où les actions électriques tendent à les éloigner. On voit que les électrodes ne recevront, au premier moment, que de l'acide sulfurique et de la potasse, c'est-à-dire l'acide ou la base des sels dans lesquels ils plongent; ce qui est d'accord avec l'expérience. Ce n'est que plus tard que l'acide azotique ira se joindre à l'acide sulfurique, et la soude à la potasse. Il serait facile d'étendre le raisonnement qui précède au cas où l'on aurait plus de deux dissolutions différentes les unes à la suite des autres.

Si l'on remplace le second sel par une base que l'acide du premier devrait traverser pour se rendre au pôle positif, on raisonnerait encore de la même manière : la base du vase moyen (*fig.* 1148) s'unirait à la molécule acide mise en liberté au point de jonction des deux liquides, et, par des combinaisons et des décompositions successives avec les molécules de base, cette molécule d'acide cheminerait vers l'électrode positif. Si l'acide devait traverser de l'eau pure; ou une base, un acide, on raisonnerait de même.

On comprend maintenant pourquoi la dissolution interposée n'arrête pas les éléments qui la traversent. Ce n'est pas, comme on l'a dit, parce que le passage de l'électricité modifie les affinités, mais c'est que les molécules qui cheminent passent d'une molécule à l'autre par des combinaisons et des décompositions successives. Les teintures végétales mêlées à l'eau se comportent comme des sels : on peut regarder, par exemple, le sirop de violettes comme formé d'une matière verte jouant le rôle de base et que peuvent neutraliser les acides, unie à une matière rouge jouant le rôle d'acide et que neutralisent les bases. On s'explique facilement alors pourquoi la couleur n'est pas altérée par le passage d'un acide ou d'une base.

1556. Substances servant d'électrodes. — Supposons maintenant que les vases *a*, *m*, *c* (*fig.* 1148) soient réunis par un arc métallique; les molécules mises en liberté à la surface du métal ne pouvant se combiner avec lui, ou, si cela a lieu, la combinaison ne pouvant se dissoudre dans le métal, l'action s'arrêtera à la surface; c'est donc là que se formera le dépôt. On peut citer à ce sujet une ancienne expérience du temps de Volta : on suspend horizontalement dans de l'eau acidulée, un bout de fil de platine, dont les extrémités ne

sont qu'à 2 à 3 millimètres des électrodes ; on voit l'oxygène et l'hydrogène se dégager aux extrémités de ce fil, et si on l'enlève, ces gaz ne se dégagent plus que sur les électrodes. — S'il se forme un sel insoluble, l'action ne pourra se propager au-delà, et le liquide dans lequel se formera le précipité servira d'électrode. Il en est de même de l'eau, quand il y arrive de la magnésie qui ne peut s'y dissoudre, c'est-à-dire dont les molécules ne peuvent se combiner avec elle. L'air même peut servir d'électrode, comme dans l'expérience de la décomposition par l'électricité de tension (1340), parce qu'il ne peut dissoudre les éléments qui se dégagent à la surface de séparation.

On peut, du reste, prendre pour conducteur humide, ne jouant pas le rôle d'électrode, une foule de substances différentes. Davy a employé du coton, de l'amiante mouillés, de la chair musculaire, et même deux doigts de la main ; le transport des éléments doit alors se faire à travers les doigts, ce qui semble, au premier abord, difficile à concevoir; cependant la décomposition des sels renfermés dans les muscles, et le transport de leurs éléments aux électrodes (1548), l'extraction des matières métalliques renfermées dans les organes (1552), montrent bien la possibilité d'un pareil mouvement chimique à travers les tissus vivants.

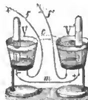


Fig. 1153.

1557. POLARISATION DES ÉLECTRODES. — Les lames de platine qui ont servi d'électrode possèdent la propriété de donner un courant, quand on supprime la pile après les avoir réunies par un fil métallique. Ce *courant secondaire* découvert par M. de La Rive, est dirigé en sens inverse de celui que la pile avait fourni ; il se produit encore quand, après avoir essuyé et lavé avec de l'eau des lames de platine, on les plonge dans un liquide autre que l'électrolyte qu'elles ont servi à décomposer. On peut montrer l'existence de ce courant, par une expérience très simple : on décompose l'eau dans deux voltamètres V, V' (*fig.* 1153), réunis dans le même circuit au moyen d'un fil métallique *m*. Au bout de quelque temps, on supprime les communications *f*, *f'* avec la pile, et l'on fait communiquer les liquides des vases, au moyen d'une mèche de coton mouillé *c*. On voit le gaz continuer à se dégager pendant quelque temps sur les électrodes que réunit le fil *m* ; seulement l'hydrogène apparaît là où se dégageait l'oxygéne, et vice-versâ.

Le courant secondaire est dû aux substances solides, liquides ou gazeuses, déposées sur les électrodes, qui sont dits alors *polarisés* ; expression, du reste, assez mal choisie. Ces substances réagissent les unes sur les autres à travers le liquide, et produisent un courant qui va, dans ce liquide, du dépôt qui joue le rôle de base à celui qui joue le rôle d'acide (1446). Pour le prouver, il suffit de tremper des lames neuves, l'une dans un acide, l'autre dans une base, de les réunir par un réomètre après les avoir essuyées et lavées, et de les plonger dans de l'eau ; on a aussitôt un courant. Nous avons vu (1461) comment on prouve la production des courants secondaires par les dépôts gazeux. Nous avons

aussi indiqué le rôle de la polarisation des lames métalliques dans l'affaiblissement des piles voltaïques, dans les piles secondaires de Ritter (1471) et, en général, dans les expériences sur l'électricité produite par les actions chimiques (1447).

1558. De l'unipolarité des flammes. — Si l'on plonge dans la flamme d'une lampe, entre deux électrodes qui s'y enfoncent, un fil métallique communiquant avec le sol, l'électrode négatif se décharge, et l'électroscope indique que la tension de l'électrode positif augmente, comme lorsqu'on fait communiquer le pôle négatif avec le sol. Pour que ces effets soient bien marqués, il faut que la pile soit isolée et susceptible d'une assez forte tension. Dans la flamme du phosphore, les effets sont inverses : c'est l'électrode positif qui se décharge. Ce phénomène a été désigné sous le nom d'*unipolarité*. M. Ohm est parvenu à l'expliquer par le dépôt de substances isolantes sur l'un ou sur l'autre électrode, suivant la nature des flammès. Cette explication se confirme quand on rapproche les phénomènes d'unipolarité des flammes, de ceux que manifestent certains corps solides ou liquides, particulièrement le blanc d'œuf, le savon. Si l'on enfonce les électrodes de la pile dans un morceau de savon, le courant est presque complétement intercepté. Si ensuite on fait communiquer le savon avec le sol, le pôle négatif se décharge, et le pôle positif acquiert la tension maximum qu'il prend quand le pôle négatif communique avec le sol. M. Ohm fait voir que cette propriété du savon n'existe pas au premier moment, mais qu'elle se développe pendant le passage du faible courant qui traverse le savon ; c'est que cette substance est décomposée et qu'il se dépose à l'électrode positif, des acides gras complètement isolants ; tandis que l'électrode négatif reçoit les bases. Si l'on met le fil négatif bien exactement dans le trou qu'occupait le fil positif au premier moment, c'est ce dernier qui se décharge, le fil négatif se trouvant enveloppé d'une couche isolante qui avait été déposée dans le trou pendant la première partie de l'opération. Pour que ces expériences réussissent, il faut employer un courant assez intense pour décomposer le savon.

1559. Résistance des diaphragmes métalliques. — La polarisation secondaire des lames métalliques va encore nous servir à expliquer le phénomène suivant, signalé d'abord par Ritter, puis étudié en 1825 par M. de La Rive [1], puis par M. Marianini et M. Marié-Davy. Quand un courant traverse des diaphragmes métalliques qui divisent une colonne liquide conductrice faisant partie du circuit, les divers effets du courant sont affaiblis. La manière la plus simple d'en faire l'expérience consiste à distribuer le liquide dans plusieurs vases de verre dans lesquels plongent les lames métalliques courbées en fer à cheval. Voici les résultats trouvés par M. de La Rive :

1° La résistance au passage dépend de la nature du liquide et du métal, même quand ce dernier n'est pas attaqué ; pour le platine, elle est plus grande avec l'acide sulfurique qu'avec l'acide chlorhydrique, et avec l'acide chlorhydrique

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXVIII, 203, et XXXVII, 225.

qu'avec l'acide azotique, surtout quand ce dernier est concentré. 2° L'intensité du courant peut renverser le rapport entre les résistances observées avec un même métal et deux liquides différents. Par exemple, quand le courant est intense et les cloisons en platine, la résistance est moindre avec l'acide chlorhydrique qu'avec l'acide nitrique. Il en résulte que, si l'on augmente le nombre des diaphragmes, ce qui affaiblit le courant, on peut voir tantôt le courant de l'appareil rempli d'acide nitrique l'emporter, tantôt celui du même appareil rempli d'acide chlorhydrique. 3° Un métal affaiblit d'autant moins le courant, qu'il est plus oxydable ; par exemple, le zinc produit moins d'effet que le platine. 4° Un courant éprouve une perte d'autant plus petite en traversant un diaphragme, qu'il en a déjà traversé un plus grand nombre. 5° La perte est d'autant plus faible que l'étendue des diaphragmes est plus grande. 6° Elle ne semble pas dépendre de l'épaisseur de la couche de liquide qui les sépare. 7° M. Poggendorff a reconnu que la perte diminue quand la température s'élève.

On avait d'abord attribué l'affaiblissement des courants par les diaphragmes, à une résistance spéciale que l'électricité éprouverait en passant d'un métal dans un liquide, et réciproquement. Il est bien probable qu'une semblable résistance existe ; mais on a reconnu, et M. Ohm le premier, que la résistance est due principalement aux dépôts sur les lames, des éléments du liquide décomposé par le courant. Ces dépôts diminuent l'intensité du courant, soit en produisant un courant contraire (1557), soit en formant une couche non conductrice qui arrête l'électricité. Pour confirmer cette explication, M. de La Rive a fait passer le courant dans des directions alternativement contraires, de manière à empêcher les dépôts de se former, et alors il n'y a plus eu d'affaiblissement du courant. Quelques-unes de ces expériences ont été faites avec une machine d'induction qui permettait de changer le sens du courant 27 fois par seconde. L'intensité du courant ne pouvant dans ce cas être mesurée par le réomètre, dont l'aiguille serait perpétuellement agitée, M. de La Rive évaluait cette intensité par l'échauffement de l'hélice d'un thermomètre de Breguet (1525). — M. Worsellmann de Heer[1] ayant employé un courant instantané, de manière à pouvoir se servir d'un réomètre pour en mesurer l'intensité, puis ayant fait aussitôt passer le courant secondaire par un second réomètre, ce courant secondaire s'est toujours montré le plus intense pour les systèmes de diaphragmes qui affaiblissaient le plus le courant instantané.

Nous devons dire cependant que MM. Fechner, Poggendorff et Lenz[1] ont admis que la résistance propre au passage forme une grande partie de la résistance observée ; mais le second paraît n'avoir pas assez rapproché les changements de sens du courant, pour empêcher la polarisation, et le troisième suppose que le courant instantané qu'il employait n'avait pas le temps de

[1] *Archives de l'électricité*, de M. A. de La Rive, t. I, p. 539 et 581.

[2] *Archives de l'électricité*, de M. A. de La Rive, t. I, p. 497 et 177.

polariser les lames, ce qui n'est pas admissible d'après les expériences de M. Worsellmann de Heer, et celles de M. Schœnbein, qui a constaté que la décharge d'une bouteille de Leyde suffit pour occasionner un courant secondaire. Nous pensons donc, avec M. de La Rive, que la résistance propre au passage d'un métal dans un liquide, ou réciproquement, n'a qu'une influence insensible, et que la diminution d'intensité du courant est entièrement due à la polarisation secondaire des lames métalliques.

1560. Anneaux de Nobili. — Le dépôt qui se forme sur les lames servant d'électrodes, présente, quand il est en couches très minces, des couleurs irisées semblables à celles que produisent toujours les lames excessivement minces, comme nous le verrons dans l'optique. M. Nobili, qui le premier a remarqué ces couleurs, les a étudiées avec détail, et leur a donné le nom d'*apparences électro-chimiques* [1]. Voici la disposition qu'il emploie : il fait communiquer avec l'un des pôles d'une pile, une plaque horizontale en platine, argent ou acier *ab* (*fig.* 1154) garnie d'un rebord en cire, sur laquelle il verse une dissolution électrolytique. Il enfonce verticalement dans cette dissolution un fil de platine communiquant avec l'autre pôle, et enveloppé d'une matière isolante, excepté à son extrémité *r*, qui est terminée en pointe très fine et est placée à une distance de 1 à 2 millimètres de la plaque. Quand on fait passer à travers ce système, le courant d'une pile à auges d'une douzaine de couples, il se forme sur la plaque, en quelques secondes, des anneaux de différentes couleurs ayant pour centre commun la projection du point *r* sur cette plaque. Ces anneaux sont dus à un dépôt d'oxyde ou de métal, quand la plaque est négative; et probablement à une altération de la surface par les acides, quand elle est positive. Plus brillants, en général, quand la plaque reçoit l'électricité positive, ils sont souvent alternativement clairs et foncés. D'autres fois, comme avec l'acétate de plomb, ils présentent les couleurs de l'arc-en-ciel; mais il ne faut pas trop prolonger l'expérience, car alors le dépôt de peroxyde de plomb est trop épais pour présenter des couleurs. Nobili a fait un très grand nombre d'expériences avec des dissolutions de divers sels ou de substances animales, des sucs de plantes. Les matières organiques donnent généralement les plus belles couleurs. Si l'on présente à la plaque, deux pointes assez rapprochées l'une de l'autre, communiquant avec le même pôle de la pile, on a deux systèmes d'anneaux, qui se rapprochent dans les parties voisines. Si, au contraire, la plaque étant isolée, les pointes apportent les électricités contraires, les anneaux se déforment comme s'ils se repoussaient; ce qui s'explique par la réunion à travers le liquide, d'une partie des électricités passant d'une pointe à l'autre sans arriver jusqu'à la plaque. Une cloison en



Fig. 1154.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXXIV, p. 280 et 419.

verre placée dans le liquide entre les deux pointes empêche les anneaux de se déformer. Nobili est parvenu à donner aux couleurs déposées sur les plaques, des dispositions formant des dessins variés ; mais il n'a pas publié le moyen qu'il employait. Il est probable qu'il opérait en faisant mouvoir une ou plusieurs pointes présentées à une petite distance de la plaque, et en employant des mélanges de différentes dissolutions. Divers physiciens, MM. E. Becquerel, Beetz, Du Bois-Reymond... ont aussi étudié les apparences électro-chimiques.

1561. Passivité du fer, etc. — Certains métaux oxydables, principalement le fer, acquièrent dans diverses circonstances, particulièrement quand on les plonge comme électrodes positifs dans de l'eau acidulée par les acides oxygénés, la propriété de n'être plus attaqués par ces mêmes acides, entre autres par l'acide azotique, même concentré. Ce phénomène singulier a été l'objet des travaux de plusieurs physiciens, particulièrement de M. Schœnbein, qui a donné le nom de *fer passif* au fer rendu ainsi inaltérable comme le platine. Voici les principaux résultats qu'il a constatés[1] : après avoir reconnu l'influence d'un électrode positif oxydable, sur l'électrolyse de l'eau par un seul couple (1551), il vit qu'un fil de fer pris pour électrode positif ne donnait aucun résultat quand on fermait le circuit en le plongeant dans l'eau acidulée du voltamètre ; car on ne voyait aucun dégagement d'hydrogène au pôle négatif formé d'un fil de platine. On peut rendre ce fer *actif*, et voir l'hydrogène se dégager, mais seulement pendant quelques secondes : 1° en mettant les électrodes en contact dans le liquide, puis les séparant ; 2° en rompant le circuit en un point quelconque, pour le fermer ensuite ; 3° en touchant le fer dans le liquide avec un métal oxydable, zinc, étain, cuivre et même l'argent ; 4° en réunissant les deux électrodes par un fil métallique capable de détourner une grande partie du courant, et en enlevant ensuite ce fil ; 5° en agitant vivement l'électrode de fer dans le liquide.

M. Schœnbein a aussi obtenu des résultats curieux en faisant communiquer les électrodes à l'extérieur, d'une manière permanente, par un fil métallique. Quand ce fil est en cuivre, de 1 millimètre de diamètre environ, et de 8 centimètres de longueur, il n'y a aucune décomposition. A partir de la longueur de 16 à 17^{cm}, la décomposition a lieu d'une manière continue, et est d'autant plus active que la longueur est plus grande, pourvu qu'elle ne dépasse pas 5 mètres. Si l'on augmente la longueur, de quelques décimètres, il n'y a pas de dégagement de gaz au moment où l'on établit la communication entre les électrodes, mais ce dégagement a lieu quelques secondes après, plus vivement qu'avec des fils plus courts ; au bout de quelques secondes, il cesse, pour se reproduire de nouveau, et l'on observe ainsi des alternatives nombreuses jusqu'à ce que le fer ait repris complètement son état passif. Si le fil de dérivation a plus de 15 mètres, il n'exerce aucune influence. Ces résultats dépendent évidemment de la quantité plus ou moins grande d'électricité détournée

[1] *Archives de l'électricité*, de M. de La Rive, t. II, p. 267, et III, p. 81.

dans ce fil; car, si l'on opère avec des fils de divers métaux, les longueurs nécessaires pour obtenir un même résultat, doivent être en rapport avec la conductibilité et la section des fils, de telle manière que la résistance au passage de l'électricité soit la même dans tous.

Les effets qui précèdent se produisent encore quand on mêle à l'eau un acide oxygéné autre que l'acide sulfurique, mais ils n'ont plus lieu avec les hydracides ou les fluorures, chlorures, bromures et iodures.

M. Schœnbein rend encore le fer passif en le faisant servir d'électrode positif pour décomposer l'acétate de plomb au moyen de plusieurs couples. Au bout de 30 secondes, le fer se recouvre d'une couche mince de peroxyde de plomb. On le lave à l'eau, et on peut l'employer aux expériences que nous venons de rapporter; il donne les mêmes résultats, seulement il ne reprend pas momentanément son activité par les moyens que nous avons énumérés; et même des fils de fer ordinaires servant d'électrode positif conjointement avec lui, perdent leur propriété de devenir momentanément actifs.

On peut encore rendre le fer passif sans l'intervention directe de l'électricité. Bergmann et Kirwann ont reconnu que le fer plongé dans un sel d'argent dont il précipite le métal, perd aussitôt la propriété de le précipiter. M. Braconnot a reconnu que le fer devient passif par son immersion dans l'acide nitrique concentré. Herschell a étudié ce phénomène, et a constaté qu'un léger frottement ne détruit pas la passivité, mais qu'un frottement assez fort peut l'enlever. M. Martens, qui a trouvé de son côté les résultats observés par M. Schœnbein, a reconnu, de plus, que le fer devient passif quand on le plonge dans l'alcool absolu, l'acide acétique, les solutions alcalines [1]; et M. Reuben Philips, dans les acides chromique, iodique, chlorique et dans l'eau oxygénée. Quand enfin on chauffe au rouge une lame de fer bien décapée, elle prend une teinte bleue et devient passive.

Causes de la passivité du fer. — On explique l'état passif du fer, par la formation à la surface de ce métal d'une légère couche, ordinairement d'un oxyde, inattaquable par les acides. Cette explication, due à M. Faraday, rend bien compte de l'ensemble des résultats obtenus par M. Schœnbein. Dans l'électrolyse de l'eau acidulée, la pellicule inattaquable se forme aux dépens de l'oxygène d'une petite quantité de liquide décomposée au premier instant. Si l'on touche dans le liquide le fer passif avec un métal oxydable, on forme un couple qui décompose l'eau, et l'hydrogène qui se dégage à la surface du fer détruit la couche d'oxyde. L'électrode négatif en platine produit le même effet qu'un métal oxydable, parce qu'il a été recouvert d'une pellicule d'hydrogène, dans la décomposition qui s'est faite au premier instant. Si l'on réunit les électrodes par un fil de cuivre, ce fil détourne le courant, et forme avec les électrodes un couple donnant un nouveau courant qui passe à travers le liquide et détruit la pellicule qui recouvre le fer. Celui-ci est donc attaqué pendant quel-

[1] *Archives de l'électricité*, de M. A. de La Rive, III, 574.

ques secondes, quand ensuite le fil de cuivre étant enlevé, le courant traverse de nouveau l'eau acidulée. Les effets qui ont lieu pendant qu'un fil réunit les électrodes, ne sont pas aussi faciles à expliquer, surtout les alternatives de repos et d'activité.

La passivité du fer qui a pris la couleur bleue sous l'action du feu, est due aussi à une pellicule d'oxyde. M. Martens, qui attribuait la passivité à une modification physique que le métal aurait éprouvée jusque dans son intérieur, a objecté que le fer chauffé au rouge dans le gaz hydrogène devient bleu et passif comme dans l'air. Mais M. Beetz a prouvé qu'il ne se produit rien de pareil quand on opère dans l'hydrogène bien pur et bien desséché, ce qui demande des précautions minutieuses [1]. Il a démontré aussi que le fer rendu passif par la chaleur ou par l'acide nitrique, perd sa passivité quand on le frotte ou qu'on le lave avec un acide.

Le fer n'est pas le seul métal susceptible de devenir passif en se recouvrant d'une pellicule mince. M. Beetz a trouvé cette propriété dans le nickel, M. Andrews dans le bismuth, et M. Nicklès dans le cobalt; ce dernier a, de plus, constaté que le cobalt et le nickel ne conservent la passivité que leur donne l'acide nitrique, qu'autant qu'on les a plongés tout chauds dans cet acide, aprés les avoir bleuis sur des charbons [2]. M. Grove et M. Schœnbein ont vu que le cuivre devient passif quand il joue le rôle d'électrode positif dans l'acide sulfurique étendu traversé par un courant très fort; alors il ne se dissout pas comme avec un courant modéré, et il arrête bientôt le passage de l'électricité, en se recouvrant d'une couche d'un oxyde particulier.

Nous rappellerons, en terminant, l'application qu'a faite M. Schœnbein, du fer passif, à la construction de piles voltaïques très énergiques (1466).

1562. Mouvements dans le mercure. — Si l'on met une couche d'un électrolyte, sur une couche de mercure bien pur placée au fond horizontal d'un vase de verre, et qu'on plonge dans l'électrolyte, et sans toucher le mercure, les deux pôles d'une pile, on voit aussitôt le liquide éprouver un mouvement rapide de circulation dans lequel il traverse la couche de mercure, en rayonnant du pôle négatif au pôle positif. Quand il y a de l'eau décomposée, les bulles de gaz entraînées avec le liquide rendent le mouvement plus facile à distinguer. Ce phénoméne, observé d'abord par Davy, a été étudié en détail par MM. Serullas, J. Herschell et Nobili. Herschell a remarqué que c'est au contact du mercure que le mouvement est le plus prononcé [3]. Si les électrodes sont en dehors du contour du mercure, le liquide est en repos autour d'eux, et ne se meut qu'au-dessus du métal; c'est donc dans le mercure que se fait le mouvement, et le liquide électrolysé n'y participe que par communication. Ce qui le prouve encore, c'est qu'il suffit d'humecter le mercure et le vase qui le

[1] *Archives de l'électricité*, de M. A. de La Rive, IV, 600.

[2] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XXXVII, p. 284.

[3] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXVIII, p. 280.

contient, avec de l'eau acidulée, pour obtenir un mouvement de rotation rapide du mercure, quand on fait passer le courant à travers la couche d'humidité. Nobili, en opérant, comme pour obtenir des anneaux colorés (1560), avec deux pointes apportant les électricités contraires sur une couche de mercure recouverte d'une solution de sulfate de soude, vit des courants rayonner autour des pointes et s'arrêter à des contours correspondants à ceux des apparences électro-chimiques ordinaires. Dans l'intérieur de ces contours, le mercure était un peu déprimé, et il se formait autour de la pointe positive un peu d'oxyde de mercure, qui était transporté par un courant rayonnant, et allait se réduire au pôle négatif. Du reste, les effets varient avec la nature des dissolutions. Quand le mercure est amalgamé avec un métal très oxydable, par exemple le sodium, ses mouvements sont encore plus prononcés ; mais ces effets, qui sont très variés, n'offrent pas d'intérêt scientifique assez direct pour que nous nous y arrêtions d'avantage.

III. Lois des décompositions électro-chimiques.

1563. Les lois des décompositions électro-chimiques constituent une des plus belles découvertes de M. Faraday [1], auquel la science en doit de si remarquables. Elles ont été généralisées et confirmées par les travaux de MM. Matteucci, Daniell, E. Becquerel, Marié-Davy, et de plusieurs autres physiciens, qui sont parvenus à faire disparaître ou à expliquer les anomalies qui avaient pu faire douter d'abord de leur généralité.

Première loi. — *L'action décomposante d'un courant, ou sa puissance chimique, est la même dans toutes ses parties.* En effet, si l'on introduit plusieurs *voltamètres* dans le même circuit, l'on trouve, au bout d'un certain temps, des quantités égales d'oxygène et d'hydrogène dans chacun d'eux. Il en est de même quand les voltamètres sont traversés par des courants distincts, pourvu qu'un même réomètre parcouru successivement par chacun d'eux donne les mêmes indications, c'est-à-dire pourvu que ces courants aient la même intensité. Les résultats sont encore identiques dans les divers voltamètres, quand l'eau y est à des températures différentes, et quand elle est rendue conductrice à des degrés différents, au moyen de substances diverses, acides, alcalis, sels, en petites quantités. Par exemple, M. Despretz a trouvé des quantités égales de gaz dans trois voltamètres placés dans le même circuit, le premier contenant de l'eau pure, les deux autres, de l'eau mêlée de $\frac{1}{10}$ et de $\frac{1}{2000}$ en volume d'acide sulfurique monohydraté ; quand le courant étant trop faible, la décomposition n'avait pas lieu dans un des voltamètres, elle n'avait pas lieu non plus dans les autres. La pression ne change rien au dégagement des gaz. M. Leeson a opéré sous différentes pressions, jusqu'à

[1] *Recherches expérimentales sur l'électricité*, t. I.

30 atmosphères, sans que le dégagement parût ralenti [1]. — On peut vérifier la loi en mettant dans le même circuit des électrolytes autres que l'eau : dans chaque appareil on trouve toujours les mêmes quantités de matière déposées ou dégagées au pôles.

SECONDE LOI. — *La quantité de substance décomposée est proportionnelle à la quantité d'électricité qui passe dans un temps donné.* En effet, si le courant se bifurque en *o* (*fig.* 1155) pour traverser deux voltamètres identiques *a* et *b*, de manière qu'il passe autant d'électricité dans chacun d'eux, on trouve en *a* et *b* les mêmes quantités de gaz au bout du même temps, et ces quantités sont égales à la moitié de celles que l'on trouve dans le voltamètre *m*, par lequel passe une quantité double d'électricité. Si l'un des voltamètres *a* ou *b*, présentant plus de résistance que l'autre, ne reçoit pas la moitié de l'électricité qui passe en *m*, il arrive toujours, comme l'a constaté M. Matteucci, que la somme des quantités de gaz recueillies en *a* et *b* est égale à la quantité recueillie en *m*. Cette égalité se remarque, quel que soit le nombre des fils contenant chacun un voltamètre, dans lesquels le courant se subdivise en *o*.



Fig. 1155.

TROISIÈME LOI. — *La quantité de substance décomposée est proportionnelle à l'intensité du courant mesurée par le réomètre.* M. Pouillet a fait un grand nombre d'expériences variées sur ce sujet ; il observait le nombre de secondes employées pour recueillir deux centimètres cubes d'hydrogène et il a toujours trouvé le même nombre, pour le produit du temps, par l'intensité magnétique du courant. M. Despretz a constaté le même résultat en employant une pile d'un grand nombre de couples ; il évaluait l'intensité magnétique du courant en faisant osciller une aiguille aimantée à une distance constante du fil du réomètre [2]. — Cette loi se vérifie également quand on emploie tout autre électrolyte que l'eau.

Pour établir cette troisième loi, il suffit, d'après la seconde, de prouver que les indications du réomètre sont aussi proportionnelles aux quantités d'électricité qui passent dans *le circuit*. M. Pouillet a procédé à cette démonstration par une méthode directe très ingénieuse : Il est évident que si l'on fait passer dans un réomètre, et par intermittences, un courant d'intensité constante, la quantité d'électricité qui passera pendant l'unité des temps, sera proportionnelle au rapport entre les durées des passages et les durées des interruptions. M. Pouillet a fait construire des roues métalliques à dents rectangulaires (*fig.* 1156), dont les intervalles sont remplies par du bois, de manière que le contour soit

[1] *Archives de l'électricité*, de M. A. de La Rive, t. II, p. 611.

[2] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XXXI, p. 420.

parfaitement uni. Une de ces roues est introduite dans un circuit contenant le réomètre ; l'un des pôles de la pile communique avec l'axe par le fil f, et l'autre avec un ressort métallique r, qui s'appuie sur le contour de la roue. Quand, celle-ci étant en repos, le ressort repose sur une dent métallique, le courant passe d'une manière continue, et l'aiguille du réomètre indique son intensité. Mais si l'on fait tourner la roue, le courant ne passe plus que par intermittences ; car il est interrompu pendant tout le temps que le ressort r repose sur une dent de bois. Cependant, si la vitesse de rotation est assez grande, l'aiguille se tient en repos, avec une déviation qui est toujours la même, quelle que soit la vitesse. Mais cette déviation est moindre que pendant le passage continu du courant ; car si les dents de métal et de bois sont égales, il passe moitié moins d'électricité dans le même temps ; si les dents de métal sont doubles des dents de bois, la quantité qui passe pendant le mouvement de la roue est les deux tiers de la quantité qui passe pendant le repos. Or, l'expérience a montré que les intensités déduites des déviations sont proportionnelles aux rapports entre les largeurs des dents de métal et des dents de bois, c'est-à-dire aux quantités d'électricité qui passent à chaque instant.

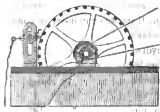


Fig. 1156.

Nous voyons donc que les quantités d'électricité qui circulent dans un circuit pendant un temps donné, peuvent s'évaluer également au moyen du voltamètre et au moyen du réomètre placé dans ce circuit ; il suffira, pour passer de l'expression de la quantité d'électricité donnée par l'un de ces appareils à celle qui serait donnée par l'autre, de savoir combien il y a de centimètres cubes de gaz dégagés dans le voltamètre pendant l'unité de temps, pour une déviation donnée de l'aiguille du réomètre.

1564. QUATRIÈME LOI. — *Quand un même courant traverse successivement plusieurs électrolytes, les poids des éléments séparés sont entre eux comme leurs* ÉQUIVALENTS CHIMIQUES. Cette belle loi, connue plus particulièrement sous le nom de *loi de Faraday*, et qui contient évidemment celles qui précèdent, a d'abord été établie au moyen d'un grand nombre d'expériences faites sur divers composés binaires, oxydes, chlorures, iodures, cyanures..., renfermant un équivalent de chaque substance [1]. Par exemple, de l'acide chlorhydrique concentré donne la même quantité d'hydrogène qu'un voltamètre placé dans le même circuit, et, par conséquent, aussi un équivalent de chlore pour un équivalent d'oxygène ; l'eau n'est pas décomposée, car il ne se dégage pas d'oxygène mêlé au chlore. Les chlorures, bromures, cyanures, donnent un équivalent de chlore, brome ou cyanogène au pôle positif, et un équivalent de

[1] *Recherches expérimentales sur l'électricité*, t. I.

métal se dépose au pôle négatif. Il faut avoir soin d'éviter les actions secondaires, et d'employer des électrodes non attaquables par les substances déposées. Pour éviter les effets secondaires qui pourraient résulter de la décomposition de l'eau, M. Faraday a aussi opéré sur divers composés en fusion ignée.

Cas des sels. — M. Matteucci a trouvé ensuite que la loi de M. Faraday s'applique aux sels neutres dont la base contient un équivalent d'oxygène pour un équivalent de métal [1]; pour chaque équivalent d'hydrogène dégagé dans le voltamètre, il y a un équivalent de métal déposé, ou un équivalent de sel décomposé. Ainsi, quand on fait passer à travers plusieurs dissolutions de différents sels, *sulfate de cuivre*, *a*, *acétate de plomb*, *b*, *azotate d'argent*, *c*..., réunies par des arcs en platine (*fig.* 1157), un courant qui traverse également un voltamètre V, on trouve que les poids respectifs des métaux déposés sur les lames de platine, et le poids de l'hydrogène déduit de son volume, sont entre eux comme les équivalents chimiques de ces substances. Pour obtenir le poids du métal, on lave et on dessèche avec soin la lame de platine sur laquelle il s'est déposé et à laquelle il adhère, on la pèse, puis on enlève le dépôt, soit mécaniquement, soit en le dissolvant dans un acide, et la diminution de poids fait connaître le poids du métal qui s'était déposé. Si l'on disposait l'extrémité positive de chaque arc de platine, de manière à pouvoir recueillir l'oxygène, on en trouverait partout le même volume que dans le voltamètre. Cependant, le volume d'oxygène est quelquefois trop faible, ce qui tient alors à des actions secondaires.



Fig. 1157.

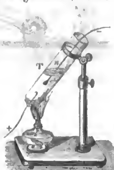


Fig. 1158.

Pour montrer que le dépôt métallique n'est pas dû à une action secondaire produite par la décomposition de l'eau, M. Matteucci a opéré particulièrement sur des sels anhydres en fusion. On voit (*fig.* 1158) un des appareils employés dans ces sortes d'expériences : la substance est fondue dans un tube de verre T dont le fond est traversé par un fil de platine qui sert d'électrode positif. Un second fil *n* sert d'électrode négatif. Le métal se dépose en *n* en petite masse arrondie; on en détermine le poids, et on le compare à celui de l'hydrogène d'un voltamètre placé dans le même circuit.

Ainsi, que l'oxyde métallique soit libre ou qu'il soit combiné avec un acide, la quantité de métal déposée dans le même circuit est toujours la même; seulement, dans le cas des sels, un équivalent d'acide vient se joindre à l'équivalent d'oxygène, au pôle positif. Pour constater directement la présence de l'acide,

[1] *Ann. de ch. et de phys.*, 2e sér., t. LVIII, p. 78; LXXI, p. 108; et LXXIV, p. 105.

M. Matteucci a électrolysé des dissolutions de *benzoates* neutres de potasse, chaux, zinc, plomb, argent. L'acide benzoïque n'étant pas soluble dans l'eau, il a pu le recueillir à l'électrode positif, et a trouvé son poids, sensiblement égal à son équivalent chimique, pour un équivalent de métal ou de base déposé à l'autre électrode. La petite différence tenait à la dissolution d'un peu d'acide benzoïque. D'ailleurs, le liquide ne manque pas de redevenir neutre quand, en le chauffant, on dissout l'acide benzoïque en reformant le benzoate. Il semble aussi résulter de là, que le travail chimique du courant est représenté par le poids du métal déposé au pôle négatif, et non par le poids de substance recueilli au pôle positif ; car ce dernier poids n'est pas le même quand l'oxyde décomposé est seul, et quand il est uni à un acide. Nous verrons plus loin une autre interprétation de ce fait (1569).

Dissolutions mélangées. — La loi de Faraday s'applique encore au mélange de deux dissolutions d'un composé binaire ou d'un sel, quand elles sont décomposées en même temps. M. Matteucci a constaté que, dans ce cas, la somme des poids des éléments déposés au pôle négatif *équivaut* au poids d'un de ces éléments qui serait déposé seul dans un électrolyte placé séparément dans le même circuit. C'est-à-dire que, si l'un des électrolytes mélangés dépose à l'électrode négatif $\frac{1}{5}$ d'équivalent de son élément électro-positif, l'autre déposera au même électrode $\frac{4}{5}$ d'équivalent du sien, pendant que le voltamètre recevra un équivalent d'hydrogène. Le travail chimique du courant restera donc toujours le même.

1565. Sels dont le métal décompose l'eau à froid. — Nous venons de voir que, quand le métal d'un sel ne décompose pas l'eau, ce métal se dépose en quantité proportionnelle à son équivalent chimique. Quand le métal est capable de décomposer l'eau, on trouve aux électrodes, indépendamment de la base et de l'acide, de l'hydrogène et de l'oxygène provenant de la décomposition de l'eau, de manière que le travail chimique du courant paraît être beaucoup plus grand que celui qui s'accomplit dans un voltamètre traversé par le même courant. Cette anomalie apparente a été éclaircie par de nombreuses expériences de M. Daniell[1]. Cet habile physicien a commencé par constater qu'il se décompose un équivalent d'eau, pour un équivalent de sel décomposé : un vase séparé par une cloison poreuse, en deux compartiments remplis d'une dissolution de sulfate de soude, recevait des électrodes en platine, disposés de manière qu'on pût recueillir les gaz dégagés. La dissolution étant traversée par le courant de 30 couples de sa pile, M. Daniell trouva un équivalent d'hydrogène et un équivalent de base au pôle négatif. La quantité de base, qui ne pouvait sortir du compartiment négatif, était mesurée par les procédés alcalimétriques. Pendant le même temps, un voltamètre à eau placé dans le même circuit avait aussi donné la même quantité d'hydrogène. Des expériences semblables ont été faites avec le sulfate de soude, l'azotate de potasse. Il ne faut

[1] *Archives de l'électricité*, de M. A. de La Rive, t. I, p. 594.

pas que l'expérience dure trop longtemps, car il y aurait, à travers la cloison poreuse, un transport de liquide, du compartiment positif au négatif (1540), qui occasionnerait la destruction d'une partie de la base mise en liberté. Pour éviter cet inconvénient, M. Daniell a aussi expérimenté avec un appareil à deux cloisons formé d'un gros tube en U entièrement rempli de liquide, et dont les deux branches, fermées par des vessies, s'engageaient dans des cylindres en verre. Ces cylindres étaient remplis de dissolution, et étaient fermés à leur extrémité supérieure par des bouchons, auxquels s'ajustaient des tubes à recueillir les gaz dégagés.

Il résulte des expériences de M. Daniell, que le courant qui décompose un équivalent d'eau dans un voltamètre, semble décomposer, dans le vase à cloisons, un équivalent d'eau et un équivalent de sel, c'est-à-dire semble accomplir un travail chimique double. Ayant remplacé le voltamètre à eau par l'appareil (*fig.* 1158) contenant du chlorure de plomb en fusion, M. Daniell trouva encore un équivalent d'eau et un équivalent de sulfate de soude décomposés, contre un équivalent de chlorure. Ces résultats s'expliquent facilement si l'on admet que le métal du sel dissous est d'abord mis en liberté, puis, que, par une action secondaire dans laquelle n'intervient plus l'électricité, ce métal décompose l'eau en s'emparant de son oxygène et dégageant l'hydrogène. Nous avons déjà indiqué (1546) les motifs, indépendants des lois de Faraday, qui nous ont fait adopter cette manière d'interpréter l'électrolyse des sels alcalins.

1566. Equivalent d'électricité. — Voltamètres. — Les lois qui précèdent définissent l'action du courant, représentée par un travail chimique déterminé. M. Faraday est parti de là pour mesurer les quantités de l'électricité qui parcourt un circuit, par les quantités d'eau décomposées, ou par les quantités de gaz dégagées dans cette décomposition. On est convenu d'appeler *équivalent d'électricité dynamique*, la quantité d'électricité capable de décomposer un équivalent d'eau, ou bien de dégager un équivalent d'hydrogène provenant de cette décomposition. Le *voltamètre* donne donc le moyen d'évaluer facilement le nombre des équivalents d'électricité qui traversent l'appareil pendant un temps donné; mais son emploi exige de nombreuses précautions pour éviter diverses anomalies dont nous parlerons plus loin (1574).

Au lieu de prendre pour équivalent d'électricité, la quantité capable de décomposer un équivalent d'eau, on peut, d'après la loi de Faraday, prendre tout aussi bien la quantité qui décompose un équivalent de tout autre électrolyte, par exemple un équivalent de sulfate de cuivre. Il suffira alors de peser le cuivre déposé sur l'électrode négatif. M. Soret a constaté que ce poids reste le même, quel que soit le sel de cuivre employé, et le degré de concentration de la dissolution. D'après cela, on a étendu le nom de *voltamètre* à tous les appareils qui peuvent servir à évaluer les quantités d'électricité par le nombre d'équivalents déposés par un composé quelconque. Cependant nous désignerons toujours par ce mot, le *voltamètre à eau*, à moins que nous n'avertissions du contraire.

Voltamètre de M. Bertin. — Dans cet instrument, d'un usage commode et rapide, les fils de platine *o*, *h* (*fig.* 1159) traversent le fond d'un gros tube de verre *ab*, fermé à chacune de ses bases par une garniture en cuivre. Le fil positif *o* est enveloppé d'un tube à boule B, par lequel on remplit *entièrement* l'appareil d'eau acidulée, pendant que l'air s'échappe par un tube capillaire *t*, que l'on ferme ensuite au moyen de mercure *v*. Quand on veut évaluer la force d'un courant, on fait arriver le fluide positif en *p*, et le fluide négatif en *n*. L'oxygène s'échappe par le tube B, et l'hydrogène n'ayant pas d'issue, refoule le liquide dans ce tube. Quand le liquide est arrivé à un repère *r*, on supprime le courant, en enlevant l'arc de communication *c* qui plonge dans des godets pleins de mercure. Le volume de liquide refoulé jusqu'au repère, représente alors le volume d'hydrogène dégagé pendant le temps de l'expérience, et les intensités de divers courants successifs seront entre elles en raison inverse de ce temps. Après chaque expérience, on retire le vase *v*, l'hydrogène s'échappe par le tube *t*, le niveau reprend sa première position dans le tube B, et l'appareil est prêt pour une nouvelle expérience.

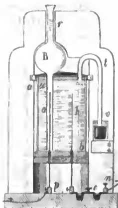


Fig. 1159.

Voltamètre à poids. — Quand on veut comparer les poids de métaux déposés dans divers électrolytes, à celui de l'hydrogène dégagé dans un voltamètre, ce dernier poids se déduit du volume, par le calcul, en faisant toutes les corrections relatives à la température, à la pression et à la vapeur d'eau, ce qui est assez long. M. E. Becquerel a imaginé un voltamètre qui donne immédiatement le poids de l'eau décomposée. Ce liquide est contenu dans un tube recourbé (*fig.* 1160), dans les branches duquel s'enfoncent des électrodes en platine. Les gaz dégagés s'échappent au dehors, après avoir traversé des systèmes de tubes T, T remplis de ponce sulfurique, destinés à retenir l'humidité que les gaz pourraient entraîner. La perte de poids de l'appareil pendant l'expérience, représente le poids de l'eau décomposée.

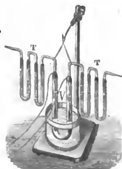


Fig. 1160.

1567. CINQUIÈME LOI. — TRAVAIL CHIMIQUE DANS LA PILE. — Les lois de l'électrolyse montrent que le travail chimique est le même dans toutes les parties d'un courant. Cette loi s'applique aussi au travail chimique qui s'accomplit dans l'intérieur de chaque couple de la pile qui fait partie du circuit, c'est-à-dire que *le travail chimique intérieur qui engendre l'électricité dans chaque*

couple, est équivalent au travail chimique produit en un point quelconque du circuit extérieur. Il est évident que cette loi suppose qu'il n'y a pas d'*action locale*, c'est-à-dire qu'il ne se produit d'action chimique dans la pile qu'autant que le circuit est fermé (1458). Pour mettre cette loi en évidence avec une pile à un seul liquide, on dispose les couples comme on le voit (*fig.* 1161). La lame de platine de chaque couple est renfermée dans un tube rempli d'eau acidulée, et engagé dans une des trois tubulures d'un flacon renfermant le même liquide. Une lame de zinc amalgamé *r*, *r*, plonge dans le même liquide, et est réunie en dehors, au platine du couple suivant. Le circuit étant fermé, et comprenant un voltamètre, on trouve toujours le même volume d'hydrogéne autour de chaque lame de platine et dans le voltamètre ; et si ce volume représente un équivalent, chaque lame de zinc a perdu une partie de son poids, égale aussi à son équivalent. MM. Boquillon et Silbermann ont expérimenté avec un couple de Smée (1463), de manière à obtenir de grandes quantités de gaz. Le courant produit passait à travers une dissolution de sulfate de cuivre ; le poids de l'hydrogène dégagé dans le couple, et du cuivre provenant de la décomposition du sulfate, ont toujours été entre eux comme les équivalents chimiques de ces substances. La pile à gaz (1472) fournit une vérification élégante de la loi qui nous occupe ; en effet, M. Grove a constaté qu'il y a toujours un équivalent d'eau formé dans chaque couple, pour un équivalent d'eau décomposé par le courant fourni par cette pile.

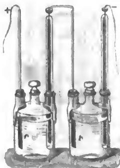


Fig. 1161.

M. Daniell a vérifié la loi, au moyen d'une pile composée de couples de force et d'espèce différentes ; dans chacun d'eux, il y a eu un équivalent de liquide décomposé, pour un équivalent d'eau dans un voltamétre placé dans le circuit extérieur. Si un couple est renversé par rapport aux autres, il se comporte comme un voltamétre et dégage un équivalent d'hydrogène *sur la lame de zinc*, et un équivalent d'oxygène sur le platine.

Dès 1834, M. Faraday avait établi cette loi pour un seul couple ; il avait reconnu qu'il faut dissoudre un équivalent de zinc dans le couple, pour engendrer la quantité d'électricité nécessaire à la décomposition d'un équivalent d'eau. Elle a été ensuite confirmée par les expériences de MM. Daniell, Buff, Soret, et, en 1835, M. Matteucci la retrouvait pour chacun des couples d'une pile à plusieurs éléments [1]. Enfin, M. Despretz [2] l'a vérifiée pour les piles à deux liquides de Bunsen et de Daniell : la quantité d'hydrogéne correspondant au poids de zinc dissous, s'est toujours trouvée égale, à moins de $\frac{1}{100}$ prés, à la

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LVIII, p. 75.

[2] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XXXIII, p. 185.

quantité d'hydrogène d'un voltamètre. La petite différence était en faveur du couple, ce qui s'explique par des actions locales ; car M. Despretz a constaté que le zinc amalgamé est toujours un peu attaqué par l'eau acidulée. Il peut aussi y avoir déperdition d'une partie de l'électricité, qui ne passe pas dans le voltamètre ; aussi M. Despretz a-t-il reconnu la nécessité d'isoler avec soin ce dernier appareil, ainsi que les couples de la pile, et d'opérer autant que possible par un temps sec et froid.

1568. Conséquences. — Il résulte de l'égalité du travail chimique dans chaque couple de la pile et dans le fil interpolaire que, pour décomposer un équivalent d'un électrolyte, il faut dépenser un équivalent de zinc dans chaque couple ; ou, ce qui revient au même, il faut dissoudre un équivalent de zinc pour produire un *équivalent d'électricité*. Par conséquent, si l'on emploie 10 couples, on dépensera dix fois plus de zinc que si l'on n'en employait qu'un, sans obtenir un travail chimique extérieur plus considérable. — Il résulte aussi de là que la quantité d'électricité qui traverse le circuit extérieur ne dépend pas du nombre des couples, quand il n'y a pas de résistance extérieure sensible ; ce qui confirme ce que nous avons dit plus haut (1454). Mais cette quantité dépend, toutes conditions égales d'ailleurs, de l'étendue des surfaces attaquées, et M. Despretz a constaté qu'elle lui est sensiblement proportionnelle. Il faudra donc, dans les opérations de l'électro-chimie, employer le moins de couples possible ; mais il faudra toujours en réunir un assez grand nombre pour que la résistance électrolytique puisse être vaincue. Si, sans arrêter complétement le courant, cette résistance est prononcée, il ne passera que peu d'électricité dans le circuit, et la quantité de zinc dissoute dans chaque couple sera aussi plus petite, de manière à être toujours équivalente à la quantité de substance décomposée ; mais l'électrolysation marchera lentement, ce qui, dans beaucoup de cas, est un inconvénient, que l'on évitera en augmentant le nombre des couples. Du reste, plus l'électrolysation sera active, plus on dépensera de zinc dans chaque couple. On voit combien ces faits sont favorables à la théorie chimique de la pile.

M. Despretz a étudié l'influence du nombre des couples de la pile de Bunsen, sur le temps employé à décomposer une certaine quantité d'eau. Ayant réuni successivement en série, 2, 4, 16, 32, 64, 128, 256 couples, il a trouvé que le temps décroît rapidement, de 2 à 4 couples et de 4 à 8 ; il varie peu de 8 à 16, et d'une manière presque insensible de 32 à 64, et de 128 à 256. On ne gagne donc presque rien, sous le rapport de la rapidité de l'électrolyse, en dépassant le nombre de 8 couples, et l'on augmente la dépense en pure perte. La pile de Daniell a donné des résultats analogues.

1569. ÉLECTROLYSE DES COMPOSÉS CONTENANT PLUS DE DEUX ÉQUIVALENTS. — LOI DE E. BECQUEREL. M. Faraday avait pensé d'abord que les composés contenant plus de deux équivalents ne pouvaient être électrolysés. Mais M. Mattencci est parvenu à en décomposer plusieurs, particuliérement le protochlorure de cuivre Cu^2Cl, et le protochlorure d'antimoine Sb^2Cl^3. M. E. Becquerel a trouvé une

loi générale de l'électrolyse, qui comprend la décomposition de ces sortes de corps. Il a eu soin de n'opérer que sur des dissolutions saturées, de manière qu'il n'y eût pas de dissolvant décomposé (1547). La dissolution était placée dans deux vases séparés *a*, *b* (*fig.* 1162) réunis par un siphon *s*. Les électrodes étaient maintenus par des bouchons fendus, fixés aux bords des vases. Le tout était recouvert d'une cloche, dans laquelle on pouvait faire le vide et introduire différents gaz, quand la dissolution était susceptible d'être altérée par l'air. Le fil réophore passait par les tubulures *o*, *o'*. Un voltamètre V, servait à mesurer la quantité d'électricité. Quelques expériences ont été faites sur des substances en fusion ignée; on y enfonçait simplement les électrodes. Voici la loi qui résulte de ces expériences, pour les composés binaires.

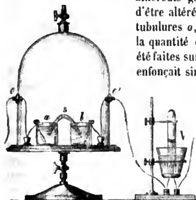


Fig. 1162.

Pour un équivalent d'électricité il y a un équivalent de l'élément électro-négatif *déposé au pôle positif.* Connaissant ensuite la formule chimique du composé, on en déduit facilement la quantité de métal déposé au pôle négatif. Par exemple, avec le perchlorure de fer Fe^2Cl^3, il y a $\frac{2}{3}$ d'équivalent de fer au pôle négatif, pour un équivalent de chlore Cl au pôle positif, ou pour un équivalent d'électricité; avec le chlorure de cuivre Cu^2Cl, il y a deux équivalents de métal mis en liberté. Les expériences ont été faites sur le protochlorure de cuivre Cu^2Cl, et sur celui d'antimoine Sb^2Cl^3; sur le perchlorure FCl^3 de fer et le perchlorure d'antimoine $AnCl^5$; sur le bichlorure de cuivre $CuCl^2$ et sur celui d'étain $StCl^4$ (le chlore était mesuré en prenant pour électrode positif une lame de cuivre qu'il attaquait, et dont on évaluait la perte de poids); sur des iodures, des bromures; sur le protoxyde et le bioxyde Cu^2O et CuO dissous dans l'ammoniaque.

Dans ces expériences, il faut se mettre en garde contre les *actions secondaires*. Par exemple, dans la décomposition des perchlorures, il peut se déposer des protochlorures au pôle négatif, ce qui rend le dépôt de métal trop faible. Dans le cas des chlorures dont le métal décompose l'eau, comme le sel marin, il se dégage de l'hydrogène au pôle négatif, où l'on trouve de la soude au lieu de métal (1546).

On voit que, d'après la loi de M. E. Becquerel, c'est l'élément électro-négatif qui détermine la quantité de substance décomposée par chaque équivalent d'électricité. Dans la loi de Faraday (1564) on prend, au contraire, pour terme

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XI, p. 162 et 257.

de comparaison, l'élément électro-positif. Or, cette dernière loi peut être regardée comme un cas particulier de la première ; car, lorsqu'il n'y a que deux équivalents en présence, pour chaque équivalent déposé au pôle positif, il y en a un de déposé au pôle négatif. Mais la loi de Faraday se trouve en défaut quand il y a plus de deux équivalents, tandis que celle de M. E. Becquerel représente tous les cas de décomposition des composéss binaires.

Ce dernier physicien a cherché à étendre sa loi au cas des sels neutres, et des sels dont la base contient plus d'un équivalent d'oxygène ou de métal, ou dont l'acide est uni à plus d'un équivalent de base. Pour cela, il considère, avec Davy et Dulong, les sels comme des composés binaires formés par la combinaison d'un métal avec un composé qui résulterait de l'union du radical de l'acide avec tout l'oxygène du sel. Ainsi, le sulfate de potasse serait SO^4Ka, au lieu de SO^3,KaO, l'hyposulfate de cuivre serait SO^2Cu^2, au lieu de SO,Cu^2O. La loi s'énonce alors ainsi : pour un équivalent d'électricité, il se dépose au pôle positif un équivalent de l'acide avec tout l'oxygène du sel ; la quantité de métal qui se dépose au pôle négatif se déduit alors de la formule chimique du composé. Par exemple, avec le sulfate SO^3,Cu^2O, M. E. Becquerel trouve deux équivalents de cuivre au pôle négatif, quand le pôle positif reçoit un équivalent d'acide et un équivalent d'oxygène. Avec l'hypo-nitrite jaune de plomb $Az^2O^4,2PbO$, HO, il se dépose deux équivalents de plomb au pôle négatif, et avec l'hypo-nitrique rouge $2Az^2O^4,7PbO,3HO$, il se dépose $\frac{7}{2}=3,5$ équivalents de ce métal, pour un équivalent d'électricité.

Eau oxygénée. — La loi de M. E. Becquerel semble en opposition avec ce qui se passe dans l'électrolyse de l'eau oxygénée : on trouve, en effet, dans ce cas, deux équivalents d'oxygène au pôle positif, pour un équivalent d'électricité. Mais cela s'explique, en considérant l'eau oxygénée comme formée d'un équivalent d'eau uni à un équivalent d'oxygène (HO, O) ; l'hydrogène se rend au pôle négatif, et l'équivalent d'oxygène au pôle positif, où se rend aussi l'oxygène abandonné par l'hydrogène ; de même que dans la décomposition des sels, le pôle positif reçoit l'oxygène de la base en même temps que l'acide. Pour appuyer cette explication, M. E. Becquerel fait passer un courant dans de l'eau acidulée renfermée dans un vase divisé par une cloison poreuse. Quand le courant est faible, l'eau n'est pas décomposée ; mais l'acide se rend dans le compartiment positif, ce qui indique que l'hydrate d'acide sulfurique est seul décomposé. Si le courant est plus fort, l'eau est aussi électrolysée, et le compartiment positif reçoit l'acide avec l'oxygène, pendant que l'hydrogène se dégage au pôle négatif,

1570. Remarques. — Conclusions. — La loi de M. E. Becquerel est aujourd'hui l'expression la plus complète de la manière dont s'accomplissent les décompositions électro-chimiques. Elle a, sur l'énoncé de M. Faraday, qu'elle comprend comme cas particulier, l'avantage de s'appliquer aux substances qui contiennent plus de deux équivalents. La loi de Faraday montre que, s'il faut un équivalent d'électricité pour décomposer un équivalent d'un

composé binaire, le fait de la combinaison d'un équivalent de chacun des éléments de ce composé dégage un équivalent d'électricité. Si l'on veut établir une semblable comparaison dans le cas où il y a plus de deux équivalents en présence, il faut d'après la loi de M. E. Becquerel, dire que : 1° pour un équivalent d'un corps jouant le rôle d'acide ou d'élément *électro-négatif* se combinant avec un ou plusieurs équivalents d'un autre corps jouant le rôle d'élément électro-positif, il y a un équivalent d'électricité de dégagé. 2° Si un équivalent d'un corps tel que l'oxygène, s'est combiné avec un autre corps jouant le rôle de base, et que la combinaison s'unisse de nouveau avec un équivalent du premier corps (l'oxygène) pour former un deuto-sel, cette seconde combinaison dégagera un équivalent d'électricité, comme la première. La quantité d'électricité dégagée ne dépendrait donc que du corps qui joue le rôle d'élément électro-négatif dans la combinaison. Mais ces dernières lois attendent encore la sanction de l'expérience.

Quant à la loi de M. Faraday, s'il reste encore bien des expériences à faire pour la vérifier dans beaucoup de cas qui n'ont pas été examinés ; on l'a trouvée exacte jusqu'à présent pour les composés formés de deux équivalents, quand on a eu soin de tenir compte des effets secondaires qui, dans certains cas, viennent la déguiser. Il s'est quelquefois présenté des anomalies, mais on a fini par en découvrir la cause. Par exemple, M. Faraday avait indiqué certains composés, comme le sulfure d'argent, le bi-iodure de mercure, qui, chauffés, laissaient passer, sans déposer leurs éléments, un nombre quelconque d'équivalents d'électricité. Mais M. Hittorff[1] a montré que le sulfure d'argent se décompose, même à froid. A chaud, la décomposition se fait plus activement, mais il y a bien moins d'un équivalent d'argent déposé, par équivalent d'électricité. Cela tient à ce que l'argent déposé forme des filaments qui établissent une communication métallique entre les électrodes, de sorte qu'une grande partie de l'électricité passe sans traverser l'électrolyte. M. Beetz a trouvé, de son côté, que le bi-iodure de mercure fondu se décompose pendant le passage du courant. Nous allons citer d'autres faits qui semblent en opposition avec les lois de l'électrolyse ; mais nous verrons, qu'on est parvenu à en trouver l'explication.

1571. Inégalité apparente dans la puissance chimique des pôles. — Il résulte des lois de l'électrolyse, que le sens du courant ne doit pas avoir d'influence sur les décompositions, puisque tout dépend de la quantité d'électricité qui passe. Or, il semble en être autrement dans certains cas : MM. Daniell et Miller ayant rempli, l'un des compartiments d'un vase séparé en deux par une cloison poreuse quelconque, avec du sulfate de cuivre ou de zinc, et l'autre compartiment avec de l'eau acidulée, virent le métal se déposer sur l'électrode négatif, quand cet électrode était plongé dans la dissolution saline ; tandis qu'il ne se dégageait que de l'hydrogène et de l'oxygène, quand il plongeait dans

[1] *Comptes rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XX, p. 1544.

l'eau acidulée. Dans les deux cas, l'électrode positif recevait, avec l'oxygène, un équivalent d'acide sulfurique. Les deux compartiments ayant été remplis avec une dissolution saline, il fut facile de reconnaître, en faisant l'essai chimique des dissolutions, que tout le métal déposé provenait du compartiment négatif. La dissolution contenue dans le compartiment positif n'avait donc pas été décomposée, quoique traversée par le courant.

M. Pouillet a observé des résultats analogues avec le chlorure d'or [1] : la dissolution est placée dans une série de tubes en U (*fig.* 1163), dont la partie courbe est plus étroite. Des arcs en platine réunissent les colonnes liquides deux à deux. Quand ce système est traversé par un courant, l'or se dépose aux électrodes négatifs pendant que le chlore se dégage aux électrodes positifs, et l'on remarque, au bout de quelque temps, que toutes les branches négatives des tubes sont moins colorées que les positives, et l'essai chimique prouve que ces dernières n'ont pas perdu de chlorure d'or. Il semble donc que le pôle négatif soit seul efficace pour produire la décomposition. Les chlorures de cuivre, de nickel, cobalt, zinc, etc., donnent les mêmes résultats. Avec les chlorures alcalins, il y a seulement une différence d'action aux deux pôles : le pôle négatif l'emporte sur le pôle positif, avec le chlorure de magnésium ; et c'est le contraire, avec les chlorures de potassium, sodium, baryum, etc.

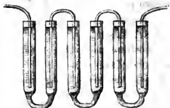


Fig. 1163.

M. Hittorf a constaté que le rapport entre les quantités de métal fournies par les deux compartiments du vase de M. Daniell, est constant pour une même dissolution, quelle que soit la force du courant ; mais le rapport change avec l'état de concentration. La quantité de métal perdue dans le compartiment négatif était déduite de l'analyse du liquide ; en la retranchant du poids de métal déposé au pôle négatif, on en concluait la quantité de métal fournie par le liquide du compartiment positif. Ces expériences ont été faites avec des sulfates de cuivre et d'argent, et l'acétate et le nitrate d'argent.

1572. Rôle de l'eau dans l'électrolyse des sels. — M. d'Alméida est parvenu à expliquer tous ces faits par l'intervention de l'eau dans la décomposition des sels [1]. Dans les expériences qu'il a faites à ce sujet, les deux portions de liquide étaient placées dans un vase P (*fig.* 1164) et dans un flacon intérieur N, et communiquaient entre elles par un petit trou *a* pratiqué dans le col du flacon, de manière que le courant pût passer, mais que les liquides ne pussent se mélanger. D'ailleurs, pour que les dissolutions fussent toujours également concentrées près de leur point de réunion, on amenait l'électricité au fond des vases, au moyen d'électrodes entourés de tubes de verre. M. d'Alméida a

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LI, p. 257.

encore opéré avec un tube en U dont les deux branches étaient séparées par un robinet en verre. Voici les résultats auxquels il est parvenu :

Considérons d'abord des sels dont le métal ne décompose pas l'eau à froid, et qui soient maintenus à l'état *neutre* au moyen d'un *électrode soluble* formé du métal même du sel (1551). Dans ce cas, la quantité de sel décomposé est la même dans chaque compartiment, et l'eau ne participe pas à la décomposition. Si, au contraire, la dissolution est acide, le compartiment positif P ne perd pas de métal, et toute la décomposition porte sur le liquide du vase négatif. C'est que le courant ne décompose pas le sel et passe entièrement à travers l'eau acidulée, qui conduit beaucoup mieux que lui (100 fois plus, par exemple, pour l'azotate d'argent). L'eau est alors seule décomposée, et le métal qui se dépose au pôle négatif provient d'une action secondaire exercée par l'hydrogène naissant qui se rend à ce pôle : cet hydrogène décompose le sel dans le compartiment négatif où il se dégage, et se substitue au métal, qui se dépose. Les résultats sont très nets avec l'azotate d'argent ; mais avec les sulfates d'argent, de zinc, de cuivre, il est impossible de maintenir la dissolution à l'état neutre, parce que l'électrode soluble ne se dissout pas assez vite pour détruire l'acide à mesure qu'il est mis en liberté ; il y a donc toujours un peu d'eau décomposée qui vient modifier les résultats.



Fig. 1164.

Dans le cas des sels alcalins et terreux, si la dissolution positive est acide, et la négative constamment neutre, celle-ci perd plus de sel que l'autre, le courant se partageant dans le liquide acide, entre le sel et l'eau. Si la dissolution négative est rendue alcaline pendant que la positive est maintenue neutre, la première perd moins de sel que la seconde, une partie du courant se portant sur l'eau que l'alcali rend conductrice. Ainsi, la présence d'un alcali ou d'un acide dans une dissolution saline fait que le sel est décomposé en moindre proportion, une partie du courant exerçant son action sur l'eau, dont l'hydrogène peut ensuite produire des actions secondaires.

Il est facile maintenant de se rendre compte des résultats obtenus par MM. Daniell et Miller et par M. Pouillet : la dissolution étant supposée neutre, le sel est d'abord seul décomposé ; mais l'acide qui est mis en liberté au pôle positif, augmente la conductibilité de l'eau, ce liquide est électrolysé, et de là, diminution dans la quantité de sel décomposée près de ce pôle. S'il y a en même temps de l'alcali autour de l'électrode négatif, la décomposition du sel sera la plus grande du côté où la conductibilité aura été le moins augmentée par la présence de l'acide ou de la base.

M. Wiedmann a trouvé une autre cause de l'inégalité apparente d'action aux pôles [1] ; c'est qu'il se fait un *transport mécanique*, du pôle positif au pôle négatif, de l'eau, qui est moins conductrice que la substance dissoute ; de

[1] *Ann. de Poggendorff*, t. XCIX, et *Ann. de ch. et de ph.*, , 3e série, t. II, p. 224.

manière que le liquide est moins concentré au pôle négatif. S'il y a une cloison poreuse, le niveau s'élève autour de ce dernier pôle.

1573. De la conductibilité propre des liquides. — Les lois de l'électrolyse supposent que *toute* l'électricité qui traverse un électrolyte est employée à en opérer la décomposition, et qu'aucune portion ne passe par *conductibilité propre*, c'est-à-dire de la même manière que dans un fil métallique. Or, c'est là une question encore très controversée. M. Faraday a toujours admis une propagation de l'électricité dans les liquides par conductibilité propre, seulement en quantité très petite. Des expériences de M. Matteucci sont favorables à cette opinion [1] : ayant disposé dans le même circuit, deux capsules remplies d'une solution d'iodure de potassium et d'amidon, mais dans l'une desquelles les électrodes étaient des fils de platine, tandis que dans l'autre ils étaient formés par des lames, il vit le liquide devenir bleu autour des fils, pendant le passage d'un faible courant, tandis qu'il n'éprouvait aucun changement dans la capsule munie de lames. Des expériences faites avec des dissolutions de sulfate de cuivre ont conduit à un résultat semblable. — M. L. Foucault, ayant monté une pile à colonne, en mettant des rondelles de drap entre *tous* les disques, n'obtint pas de courant ; mais ayant doublé les rondelles, de deux en deux, il observa un courant dont le sens était le même que s'il avait supprimé les rondelles simples ; ce qu'il explique par la conductibilité propre de l'eau acidulée, résistant moins dans les rondelles les plus minces. M. Despretz [2] a pu faire passer pendant longtemps à travers l'eau, un courant déviant de 15° à 20° l'aiguille d'un réomètre de 1500 tours, sans apercevoir de traces de gaz sur les fils, en se servant de forts microscopes.

D'un autre côté, M. de La Rive [3] fait remarquer qu'un seul couple décompose l'eau acidulée : au premier moment, il a vu son réomètre marquer 20° à 25°, puis s'arrêter à 5 ou 6°, à cause de la polarisation des lames de platine. En faisant le vide, il a aperçu des bulles très fines de gaz se dégager de ces lames, et le réomètre revint alors à 20°. Il admet, et c'est aussi l'avis de M. Becquerel et de M. Poggendorff, que la décomposition a lieu tant que passe le courant ; seulement les gaz dégagés sont en si petite quantité, qu'ils se dissolvent dans le liquide, ou restent sur les électrodes. — M. Buff, en opérant avec de faibles courants, a toujours trouvé la même quantité de métal déposée dans des dissolutions de sels d'argent ou de cuivre à différents degrés de concentration [4]. Ayant disposé dans le même circuit, un voltamètre à eau acidulée, et une dissolution d'azotate d'argent, il obtint au bout de 96 heures, 6,45 milligrammes d'argent, et il ne vit aucun dégagement de gaz dans le voltamètre ; le volume d'hydrogène correspondant aurait dû être de 0,7 centimètres cubes. Or, en 96

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LXVI, p. 225.
[2] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XLII, p. 707.
[3] *Archives de l'électricité*, de M. A. de La Rive, t. III, p. 159.
[4] *Bibl. univ. de Genève* (Archives des sciences), t. XXII p. 344, et XXV, p. 65.

heures, on conçoit que cette quantité très minime de gaz a pu facilement disparaître. M. Soret [1] a fait aussi beaucoup d'expériences sur différentes espèces de sels de cuivre, à différents degrés de concentration et à différentes températures, et il a toujours trouvé les mêmes quantités de cuivre déposées, quoique ces dissolutions dussent avoir nécessairement des conductibilités physiques différentes. La dissolution bouillante de sulfate de cuivre lui donna cependant un peu moins de cuivre que les autres ; mais il reconnut qu'elle a la propriété de dissoudre un peu de ce métal. Il a même pu constater que, dans la décomposition de l'électricité par influence à travers l'eau, il y a électrolysation de ce liquide. Voici comment il opère : il dispose l'un dans l'autre deux vases en verre à bord vernis et bien desséchés, il verse de l'eau dans l'espace qui les sépare, ainsi que dans le vase intérieur, de manière à constituer une bouteille de Leyde dont les armatures sont formées par le liquide. Des lames de platine sont plongées dans l'eau des deux armatures, et servent à charger l'appareil. Or, les électricités qui se déplacent dans les armatures décomposent le liquide, car on trouve les lames de platine polarisées, quand on a soin de charger plusieurs fois l'appareil et de le décharger au moyen d'un excitateur. Après 16 charges, les lames de platine étant réunies par un réomètre, donnaient un courant secondaire indiquant que l'hydrogène s'était déposé sur la lame qui communiquait avec l'armature négative [2].

Il semble donc résulter de ces expériences, que l'électricité ne peut traverser l'eau sans la décomposer. Cependant le fait seul du passage de l'électricité à travers le mercure, quoiqu'il ne soit pas électrolysé, prouve que l'état liquide n'est pas opposé à une conductibilité propre pour l'électricité. Remarquons aussi, avec M. L. Foucault, que, dans les réactions des composés, les électricités dégagées doivent se recombiner à travers le liquide, sans quoi elles réagiraient pour s'opposer à la continuation de l'action chimique. Tout ce qu'on peut conclure, c'est que les liquides ne laissent passer que de très petites quantités de fluide, autrement que par électrolysation ; de même qu'ils ne laissent passer que très peu de chaleur par conductibilité. Dans tous les cas, la quantité inefficace d'électricité est trop faible pour que les lois de l'électrolyse ne se vérifient pas avec le degré d'approximation que comportent les méthodes de mesure que l'on emploie. M. Becquerel remarque qu'il peut se faire aussi, que la petite quantité d'électricité qui est capable de passer par conductibilité propre quand le courant est assez faible pour qu'il n'y ait pas de décomposition, passe par la voie plus facile que lui offre l'électrolyse, dès que la décomposition est commencée, et qu'alors il n'y ait plus qu'un seul mode de propagation de l'électricité. Cette manière de voir, très vraisemblable, con-

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XLII, p. 257, et t. XLVII. p. 129.

[2] On s'assurait que l'électricité ne pouvait passer d'une armature liquide à l'autre, par les parois du vase intérieur, ce qui aurait constitué un courant proprement dit, en faisant arriver l'électricité sur ces parois ; la lame extérieure ne présentait pas de traces de polarisation.

cilierait les expériences en apparence contradictoires qui ont été faites sur ce sujet.

1574. Anomalies dans l'emploi des voltamètres. — L'usage des voltamètres à eau a fait connaître aussi différentes anomalies dont on n'a pas tardé à trouver les causes. M. Gassiot [1] et M. L. Foucault ont reconnu que la quantité de gaz recueillie dans divers appareils placés dans le même circuit, est d'autant plus petite que les surfaces des électrodes en platine sont plus grandes. M. de La Rive a étudié l'influence de ces surfaces, quand elles sont inégales dans le même appareil ; il a reconnu que la quantité de gaz dégagée sur l'électrode le plus étendu est plus petite qu'elle ne devrait l'être. — M. Jamin a varié ces expériences de manière à rendre les résultats plus saillants [2]. Par exemple, ayant pris pour électrode *négatif* une lame de platine de 15 centimètres carrés, et pour électrode *positif*, un fil très fin, le volume d'oxygène dégagé sur le dernier fut de 9 centimètres cubes, tandis que le volume d'hydrogène dégagé sur la lame ne fut que de 5^{cc}, au lieu de 18. Le sens du courant ayant été renversé, l'oxygène dégagé sur la lame n'occupa que 1^{cc}, et l'hydrogène dégagé sur le fil, 9^{cc},3. Dans une autre expérience, deux voltamètres semblables à celui dont nous venons de parler ayant été placés dans le même circuit, de manière que la lame fût positive dans l'un et négative dans l'autre, les volumes d'hydrogène et d'oxygène furent pour l'un 929 et 579, dont le rapport est 1,60, au lieu de 2, et pour l'autre 1204 et 272, dont le rapport est 4,42. On peut même, avec une lame suffisamment large, n'avoir aucun dégagement de gaz, tandis qu'il s'en produit un abondant sur le fil. Si l'un des voltamètres porte les deux lames, et l'autre les deux fils, chaque électrode dégage les mêmes quantités de gaz que dans la disposition précédente ; on en recueille donc beaucoup plus dans le voltamètre à fils que dans le voltamètre à lames. — M. L. Foucault ayant mis dans le même circuit deux voltamètres identiques, formés de faisceaux de lames de platine bien dressées, et dont l'un contenait de l'eau distillée et l'autre de l'eau mêlée avec $\frac{1}{10}$ d'acide sulfurique, obtint 10 fois plus de gaz dans le second que dans le premier voltamètre.

Causes de ces anomalies. — Les résultats qui précèdent semblent en contradiction avec la loi de Faraday ; mais puisqu'on peut n'obtenir qu'un seul gaz dans un voltamètre à lames inégales, il faut bien admettre que celui des éléments de l'eau qui ne se dégage pas, se combine avec le liquide, ou se condense sur la lame de platine. M. Faraday, dès 1834, et plus tard M. Meidinger [3], ont reconnu que l'oxygène est absorbé par l'eau, en formant du *bioxyde d'hydrogène* en quantité d'autant plus grande que l'électrode positif offre plus de surface. La chimie nous apprend que la présence de l'acide sulfurique et le refroidissement favorisent la formation de ce composé ; aussi, M. Meidinger

[1] *Archives de l'électricité*, de M. A. de La Rive, t. II, p. 610.

[2] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XXXVIII, p. 390 et 443.

[3] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XLI, p. 115.

a-t-il remarqué qu'il manque d'autant plus d'oxygène, que l'eau contient plus d'acide, et M. F. Leblanc, qu'il en manque aussi d'autant plus que la température est plus basse, même quand les électrodes sont en platine, si l'on a soin d'entourer le voltamètre d'un mélange réfrigérant. M. Soret a trouvé, de son côté, que, dans deux voltamètres consécutifs, les quantités totales de gaz dégagées étaient plus grandes dans celui qu'il maintenait à 100°, que dans l'autre qu'il refroidissait.

Indépendamment de cette action secondaire dans le liquide, il se fait une absorption d'oxygène sur la lame positive. Quelques physiciens, avec M. Schœnbein, n'y voient qu'une adhérence mécanique du gaz; mais M. de La Rive admet une véritable oxydation du platine par l'oxygène, qui se trouve dans un état particulier dont nous parlons plus loin (1576). En effet, ayant fait passer dans le voltamètre, des courants alternativement en sens opposé, il remarqua que le platine se recouvrait d'une poussière noire de métal désagrégé, qu'il attribue à des oxydations suivies de réductions, répétées à chaque renversement du courant.

Quand, l'électrode négatif présentant une grande surface, c'est l'hydrogène qui disparaît en tout ou partie, il se forme évidemment, à ses dépens, des composés nouveaux; car M. Jamin a observé que la lame négative prend une couleur violacée, et la lame positive une couleur orange. Ces couleurs passent peu à peu au noir. De plus, l'hydrogène recueilli présente des propriétés particulières : si l'on introduit dans la cloche graduée qui le contient, un fil de platine qui plonge en même temps dans l'eau et dans le gaz, ce dernier est absorbé peu à peu, et la quantité absorbée représente quelquefois les trois quarts du volume primitif. L'hydrogène obtenu par les procédés chimiques ordinaires n'est pas absorbé dans les mêmes conditions.

Il peut aussi arriver que la quantité totale des deux gaz soit diminuée par leur recomposition, après qu'ils se sont dissous dans le liquide; ou bien par l'absorption d'une certaine quantité d'hydrogène par l'eau oxygénée préalablement formée, comme l'a reconnu M. Meidinger. M. Matteucci, qui admet l'existence d'une conductibilité propre dans les liquides (1573), explique encore le faible volume de gaz que l'on obtient dans les voltamètres à larges électrodes, par le passage d'une plus grande proportion d'électricité n'agissant pas électrolytiquement, tandis qu'avec des fils fins, toute l'électricité se répandant par un petit nombre de points, les molécules d'eau sont plus vivement sollicitées, et la propagation se fait presque totalement à la faveur de l'électrolyse. Enfin, quand on opère avec une forte pile, une partie des gaz peut ne pas se rendre dans les tubes destinés à les recueillir; en effet, M. Despretz a vu l'eau devenir mousseuse dans les tubes, au point qu'on ne pouvait distinguer la flamme d'une bougie en regardant à travers. Cette eau, refoulée par le gaz qui se dégage, peut entraîner avec elle des bulles qui se perdent à l'extérieur. M. Despretz évite cet inconvénient, en garnissant la partie inférieure des lames d'un enduit isolant.

Précautions à prendre dans l'emploi des voltamètres. — Il résulte de ce qui précède que, pour obtenir des résultats corrects avec les voltamètres, il faudra prendre certaines précautions. D'abord, il faudra employer de l'eau faiblement acidulée, opérer sur de petites quantités, et renouveler le liquide à chaque expérience. Les électrodes devront être formés avec des fils fins recouverts à leur partie inférieure d'une couche isolante. Il faudra, enfin, éviter d'opérer à une température trop basse. Il vaut mieux ne recueillir que l'hydrogène, qui est moins sujet à être absorbé ; ce qui, d'un autre côté, évite la combinaison de ce gaz avec l'oxygène par un effet que nous avons analysé en parlant de la pile à gaz (1472). Pour empêcher le mélange des portions de liquide qui baignent les électrodes, M. Poggendorff termine les éprouvettes par des cylindres en argile poreuse fixés au fond du vase.

Les voltamètres à poids (1566), qui ne contiennent que peu de liquide, et dans lesquels les gaz ne séjournent pas, sont moins sujets à erreur que ceux dans lesquels on mesure les volumes des gaz dégagés.

1575. Détonation dans les voltamètres. — Quand les deux gaz dégagés dans un voltamètre se rendent dans un même vase, le mélange explosif qu'ils forment peut détoner quand les lames de platine ne sont plus couvertes par le liquide. La *fig.* 1165 représente le petit appareil au moyen duquel on peut observer ce phénomène singulier, découvert par M. Bertin[1]. Les gaz se rendent dans l'éprouvette *e* fermée par le bouchon *b*, quand on fait passer le courant de 40 à 50 couples de Bunsen, et les gaz se rendent dans l'éprouvette *e*, et quand ils ont refoulé l'eau *acidulée*, de manière qu'il n'en reste que peu dans l'éprouvette *e*, le mélange gazeux détone, et l'éprouvette est lancée avec force en se séparant[2] du bouchon *b*. Les lames ne sont pas chaudes et la pile ne peut donner que des étincelles d'une longueur insensible ; ce qui montre que l'explosion n'est pas produite par la chaleur, mais par l'électricité, imprimant aux lames de platine une propriété particulière jusqu'à présent inexpliquable. Quand on n'emploie que 30 couples, il n'y a pas explosion ; mais quand les lames de platine sont un peu découvertes, le volume du gaz n'augmente plus, comme si les lames recomposaient par le haut, les gaz que l'on voit se dégager au bas. Des lames en platine platiné donnent les mêmes résultats.



Fig. 1165. — 1/8

Quand, au lieu d'eau acidulée, on emploie de l'eau ordinaire et des lames de platine platiné, il n'y a plus d'explosion même avec 50 couples ; mais il se produit un phénomène singulier : le niveau de l'eau baisse d'abord jusqu'à la base des lames, puis il remonte à leur sommet, et oscille continuellement entre ces deux

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LXVI, p. 233.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LI, p. 450.

positions. Ces phénomènes n'ont pas encore été expliqués ; on entrevoit cependant qu'il y a quelque analogie avec ce qui se passe dans les couples à gaz (1473).

IV. De l'ozone.

1576. Découverte de l'ozone. — Avant de passer aux applications de l'électro-chimie, nous avons à faire connaître des phénomènes très singuliers produits par l'électricité. Ces phénomènes, découverts par M. Schœnbein, ont excité au plus haut degré la curiosité des physiciens, et malgré les travaux nombreux dont ils ont été l'objet, leur explication est encore entourée d'obscurité.

Vers 1789, Van-Marum ayant fait passer un grand nombre d'étincelles électriques à travers du gaz oxygène renfermé dans une éprouvette placée sur le mercure, trouva que ce gaz avait acquis une odeur pénétrante, se rapprochant de celles de l'acide sulfureux, du phosphore ou du gaz nitreux. Cette odeur fut regardée comme appartenant à la *matière électrique*. Une odeur semblable se remarque dans le voisinage des fortes machines électriques en activité. On l'observe encore dans les localités qui viennent d'être frappées de la foudre (1371). Van-Marum reconnut aussi que l'oxygène odorant a la propriété d'oxyder rapidement le mercure à froid, si bien qu'il vit quelquefois le gaz diminuer de $\frac{1}{2}$ de son volume dans l'éprouvette où il opérait. Ce dernier résultat fut attribué à quelques traces d'acide azotique formé aux dépens d'un peu d'azote mêlé à l'oxygène.

Ces expériences étaient à peu près oubliées, lorsque M. Schœnbein, vers 1840, découvrit un fait nouveau qui vint les rappeler à la mémoire des physiciens. Il remarqua que l'oxygène dégagé dans l'électrolyse de l'eau acidulée, possède une odeur pénétrante, qui est précisément celle qu'avait observée Van-Marum. Il se livra alors à une étude détaillée de ce phénomène et donna le nom d'*ozone* à la substance qu'il supposait mêlée à l'oxygène et qui lui donnait ses nouvelles propriétés. Il trouva le moyen aussi d'obtenir l'ozone par des procédés purement chimiques, en faisant passer un courant d'air ou d'oxygène *humide* sur des fragments de phosphore [1]. L'ozone a été, depuis, l'objet des travaux de plusieurs autres physiciens, parmi lesquels nous citerons d'abord MM. Marignac, de La Rive, E. Becquerel.

1577. Propriétés de l'ozone. — M. Schœnbein a constaté que : 1° l'oxygène odorant polarise une lame d'or ou de platine qu'on y plonge bien desséchée. Le sens du courant que l'on obtient en enfonçant la lame dans un liquide conducteur, avec une autre lame de même métal qui a été plongée dans l'oxygène ordinaire, indique que la lame polarisée est négative par rapport à l'autre.

[1] *Bibl. univ. de Genève* (1840), t. XXVIII, 342, et *Arch. de l'électr.*, t. V, 11 et 337.

Il suffit de chauffer la lame polarisée, ou de la plonger dans une atmosphère de gaz hydrogène, pour lui faire perdre sa polarité, quo, sans cela, elle conservo pendant un certain temps. On peut polariser une lame d'or ou de platine, de la même manière, en l'opposant froide et sèche à l'aigrette qui s'échappe d'une pointe placée sur une machine électrique.

2° L'eau n'a pas d'action sur l'ozone ; il en est de même de l'acide sulfurique, de l'ammoniaque, de l'eau de baryte.

3° L'ozone détruit les couleurs organiques ; il se comporte, dans une foule de réactions, comme le chlore et le brome. Il décompose l'iodure de potassium : une dissolution de ce sel absorbe l'oxygène ozoné, et forme de l'iodate de potasse ; il y a diminution de volume, et le gaz qui reste est de l'oxygène ordinaire. Un morceau de papier imbibé d'iodure de potassium, et mis en contact avec l'oxygéne odorant, prend une couleur jaune due à l'iode mis en liberté. Si le papier est amidonné, il prend une couleur bleue. Cette réaction fournit un moyen commode de constater la présence de l'ozone.

4° Les affinités de l'oxygéne ozoné sont fortement exaltées : *quand il est humide*, il oxyde la plupart des métaux en les amenant au maximum d'oxydation. Il fait passer les acides sulfureux et azoteux à l'état d'acide sulfurique et azotique ; il se comporte dans beaucoup de cas comme les peroxydes de plomb, de manganèse et d'argent, et surtout comme l'eau oxygénée. L'air ozoné forme des azotates en présence des bases énergiques et de l'eau. Il faut remarquer l'oxydation à froid de l'argent, et celle du mercure. Quand le gaz est sec, il n'y a pas d'oxydation, même avec le cuivre et le zinc.

5° Enfin, MM. E. Becquerel et Fremy ont reconnu que l'ozone altère rapidement le caoutchouc, le perce et le rend cassant.

Toutes ces réactions, même celles de l'iodure de potassium, ne se produisent que sous l'influence de l'humidité. MM. E. Becquerel et Fremy ont renfermé dans des tubes scellés à la lampe et remplis d'oxygéne sec, de l'iodure de potassium fondu, des métaux secs, et il n'y a eu aucuno absorption de gaz après une longue suite d'étincelles électriques lancées à travers les gaz, et qui produisaient de l'ozone, comme nous allons le voir.

1578. Conditions de la production et de la destruction de l'ozone. — M. Schœnbein a constaté que l'odeur de l'ozone ne se manifeste, pendant l'électrolyse de l'eau, que dans l'oxygène dégagé. Du reste, elle se produit encore quand ce gaz se mêle à l'hydrogène ; mais il faut toujours que les électrodes soient formés d'un métal non oxydable, comme l'or, le platine, et que l'eau soit rendue conductrice par les acides sulfurique, azotique ou phosphorique, ou par certains sels oxygénés. L'ozone ne se produit pas dans les dissolutions de chlorures, bromures, iodures. Le gaz ozoné conserve indéfiniment son odeur et ses propriétés quand on le tient renfermé dans un flacon bien bouché. — On fait disparaître toute odeur, et on ramène l'oxygène à son état ordinaire, en jetant dans le flacon, de la poussière de charbon, du mercure, ou un métal oxydable en poudre. La chaleur détruit aussi l'ozone : si l'on fait passer le

gaz odorant dans un tube chauffé à 240° environ, il perd son odeur, et l'ozone est détruit ; c'est pourquoi il ne s'en produit pas quand on électrolyse l'eau chaude. M. Andrews a reconnu que, renfermé dans un tube porté à 100°, l'ozone se détruit peu à peu. Il paraît cependant qu'une température très élevée peut ozoniser l'air : M. Leroux ayant fait passer par l'ouverture effilée d'un entonnoir renversé, un fil de platine, porté au rouge par le passage d'un courant, a reconnu que l'air qui sort par le bec de l'entonnoir est fortement ozoné. — L'ozone disparaît instantanément quand on met le gaz en contact avec la vapeur de l'eau bouillante.

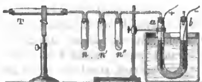


Fig. 1166.

M. Marignac a reconnu, en électrolysant l'eau dans le vide, que la présence de l'azote n'est pas nécessaire à la production de l'ozone [1], comme l'avait cru M. Schœnbein ; même quand l'expérience avait marché pendant plusieurs jours, et que le quart de l'eau avait été décomposé, il se produisait du gaz odorant comme au commencement. MM. Fremy et E. Becquerel sont arrivés au même résultat [2]. La *fig.* 1166 représente l'appareil dont ils se servaient : l'eau acidulée est contenue dans le tube recourbé *ab* ; *n*, *n'*, *n''* sont des tubes laveurs remplis d'eau, dans lesquels s'arrête l'acide sulfurique qui pourrait être entraîné. L'oxygène odorant s'échappe par le tube T, dans lequel on place les substances que l'on veut soumettre à son action. M. Marignac a obtenu l'ozone bien plus rapidement sans électricité, en faisant passer de l'air *humide* dans un tube sur des bâtons de phosphore. L'oxygène pur et *sec* est incapable de prendre l'odeur de l'ozone dans les mêmes conditions. L'acide carbonique, l'hydrogène, l'azote, mêlés à l'oxygène, lui donnent aussi la propriété de produire de l'ozone avec le phosphore, tandis que, isolés, ils n'en produisent pas. En résumé, toutes les fois que la lueur du phosphore ne se montre pas dans l'obscurité, il ne se forme pas d'ozone.

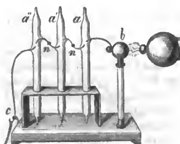


Fig. 1167.

MM. Fremy et E. Becquerel ont aussi, comme l'avait fait M. Marignac, obtenu l'ozone au moyen d'étincelles électriques lancées dans l'oxygène *sec*. Ils ont employé ce gaz préparé par différentes méthodes, et purifié avec un soin extrême ;

[1] *Archives de l'électricité* de M. A. de La Rive, t. V, p. 5.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXV, p. 62.

ils l'ont introduit dans des tubes *a*, *a'*, *a"* (*fig.* 1167), dont les extrémités étaient ensuite scellées à la lampe, et ils y ont fait passer une série d'étincelles, au moyen des fils de platine *b*, *n*, *n*, *c*. Ils ont reconnu que la proportion de gaz absorbable par l'iodure de potassium, est d'autant plus grande que les étincelles sont plus longues et le volume du gaz plus petit. Dans des tubes égaux, la proportion de gaz absorbable augmente à peu prés proportionnellement au temps pendant lequel on fait passer des étincelles, jusqu'à la 12e heure ; mais ensuite, cette proportion diminue ; ce qui paraît tenir à ce que l'étincelle détruit ce qu'elle a produit d'abord. Pour transformer tout l'oxygéne, on a alors opéré de manière que le gaz modifié fût absorbé au fur et à mesure de sa formation. L'oxygéne était contenu dans un petit eudiomètre *ab* (*fig.* 1168) reposant sur un bain d'iodure de potassium ; les étincelles passaient entre deux fils de platine *a* scellés à la partie supérieure, et bientôt le liquide remplissait totalement le tube. Une lame d'argent peut aussi absorber tout le gaz, mais moins rapidement que l'iodure de potassium. L'eudiomètre repose alors sur l'eau, bouillie et recouverte d'huile à l'extérieur, pour éviter la dissolution de l'air. Sans lame d'argent, cette eau n'absorbe aucune portion de l'oxygéne transformé par l'étincelle. Remarquons enfin que l'oxygéne odorant obtenu par l'électrolyse de l'eau, ne renferme qu'une trés petite quantité de gaz absorbable, tellement que l'iodure de potassium n'y produit pas d'absorption sensible.



Fig 1168.

MM. E. Becquerel et Fremy ont encore obtenu l'ozone par l'électrisation à distance : un tube rempli d'oxygéne pur, et scellé à la lampe (*fig.* 1169) est placé entre les pointes d'un excitateur universel ; on fait passer entre ces pointes une série d'étincelles qui glissent sur la surface extérieure du verre ; et aussitôt on voit devenir bleue, une bande de papier amidonné et ioduré renfermée dans l'intérieur du tube. Si l'on remplace l'oxygéne par de l'hydrogène, le papier ne se colore pas ; ce qui prouve que ce n'est pas l'électricité, qui décompose l'iodure de potassium. La production de l'ozone dans l'oxygène sec et pur prouve qu'il ne renferme pas de composés azotés ou hydrogénés.


Fig. 1169.

1579. De la nature de l'ozone. — La nature de l'ozone est encore entourée d'obscurités. Quand on considére les nombreuses propriétés de cet agent, les réactions énergiques qui s'accomplissent sous son influence, les circonstances variées dans lesquelles il prend naissance, on ne peut s'empêcher de songer à cet ancien *phlogistique* qui servait à expliquer toute une classe de phénomènes, et dont la chimie pneumatique est venu rayer le nom de la science. M. Schœnbein a d'abord pensé que l'ozone était une substance particulière

mêlée à l'oxygène ; il a même eu l'idée de le regarder comme le résultat de la décomposition de l'azote, qu'il supposait nécessaire à sa production. Il l'a ensuite considéré comme un suroxyde d'hydrogène. Mais l'ozone ayant été produit en l'absence de l'azote et dans l'oxygène pur et sec, MM. Marignac et de La Rive, en 1845, ont expliqué les propriétés de l'oxygène ozoné en supposant que l'électricité amène l'oxygène ordinaire à un état moléculaire particulier, dans lequel ses affinités sont surexcitées. M. Schœnbein n'a pas tardé à partager cette opinion, corroborée plus tard par les expériences de MM. Fremy et E. Becquerel, qui ont même proposé de renoncer au mot *ozone*, et de désigner sous le nom d'*oxygène électrisé*, le gaz qui présente l'odeur et les propriétés particulières que nous avons énumérées. M. Schœnbein a plus tard admis deux états différents de l'oxygène actif, l'un positif, l'autre négatif (*ozone* et *antozone*) [1]. M. Clausius et M. de La Rive partant de l'idée, admise par quelques chimistes, que la molécule d'oxygène est composée de plusieurs atomes groupés, ont pensé que, dans le gaz ozoné, les atomes du groupe moléculaire ont été séparés.

M. Williamson, puis en 1849 M. Ozann, avancèrent qu'il y a plusieurs espèces d'*ozone* : celui qui se produit dans l'électrolyse de l'eau serait un suroxyde d'hydrogène, celui qu'engendre une série d'étincelles serait de l'acide azoteux, et celui qui se produit au contact du phosphore serait un mélange des deux autres. Vers 1853, M. Beaumert chercha à établir qu'il y a deux espèces d'ozone, l'un, formé par électrolyse, serait le suroxyde HO^3 ; l'autre, produit par l'étincelle en l'absence de toute humidité, serait de l'oxygène électrisé [2]. Mais M. Th. Andrews [3] a reconnu que l'oxygène ozoné ne peut contenir d'hydrogène ; car, alors, il donnerait de l'eau en se décomposant par la chaleur. Or, ayant fait passer 8 à dix litres d'oxygène sec provenant de l'électrolyse de l'eau, dans un tube chauffé où l'ozone était détruit, suivi d'un tube en U renfermant de l'acide phosphorique, le poids de ce dernier tube n'augmenta que d'une fraction de milligramme, tandis qu'avec la quantité d'ozone que renfermait l'oxygène, ce poids eût dû augmenter de 10 à 14^{mgr}, si l'ozone était le composé HO^3. Il fit encore passer 10 litres d'oxygène ozoné bien desséché, à travers deux tubes à boules de Liebig, le premier contenant de l'iodure de potassium, et le second de l'acide sulfurique concentré. L'ozone se décomposait dans le tube à iodure, et la quantité d'iode mise en liberté faisait connaître le poids de l'oxygène absorbé provenant de l'ozone. Or, ce poids était égal à l'augmentation de poids des deux systèmes de boules, c'est-à-dire à la quantité d'oxygène qu'ils avaient retenue. Si l'ozone était le composé HO^3, une partie de l'oxygène serait restée à l'état d'eau, et la quantité d'iode isolée n'aurait pas été aussi grande. L'iode était dosé au moyen d'une dissolution titrée d'acide

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LV, p. 216, et LVIII, 479.
[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXIX, p. 477.
[3] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XLVII, p. 181.

sulfureux, et les extrémités des différentes parties de l'appareil étaient usées à l'émeri et s'emboîtaient les unes dans les autres, pour éviter l'emploi du caoutchouc. M. Andrews explique la discordance entre ces résultats et ceux de M. Baumert, par l'influence de traces d'acide carbonique, dont on ne peut éviter la présence qu'avec beaucoup de peine.

Il résulte des expériences de M. Andrews, qu'il n'existe pas deux espèces d'ozone, et que cet agent ne renferme pas d'hydrogène. On voit donc que l'opinion la plus plausible, dans l'état actuel de la science, est que l'ozone n'est pas un corps composé, et que les effets qu'on lui attribue sont produits par l'oxygène dans un état d'activité particulière provoquée par l'électricité, et que l'on peut comparer à celle qu'il possède quand il est à l'état naissant. Du reste, il paraîtrait que d'autres corps peuvent présenter aussi des propriétés particulières quand ils sont obtenus par électrolyse ; du moins, c'est ce que M. Ozann a cru pouvoir conclure de certaines expériences, pour l'hydrogène. Nous avons vu aussi quels phénomènes singuliers présente ce gaz dans le voltamètre (1574).

1580. De la présence de l'ozone dans l'atmosphère. — M. Schœnbein a constaté que le papier ioduré et amidonné bleuit peu à peu sous l'influence de l'air atmosphérique, et il en a conclu qu'il y a habituellement dans l'air, de l'ozone produit, au moins en partie, par les orages. La coloration ne se manifeste pas également partout : il résulte d'expériences de M. Cahours, de M. Bineau....., qu'elle ne se montre pas, ou est à peine sensible, dans les villes populeuses, là où l'agglomération des habitants est la plus grande ; elle se manifeste, au contraire, en pleine campagne, surtout dans les localités où il y a beaucoup d'arbres. M. Schœnbein pense que le rôle de l'ozone est de détruire les miasmes à la manière du chlore. Il a vu, en effet, l'air d'un ballon, infecté par le séjour de chair en putréfaction, perdre son odeur quand il y formait de l'ozone au moyen du phosphore, et ne manifester la présence de cet ozone qu'après que toute mauvaise odeur avait disparu. Du reste, l'ozone en trop grande quantité agit énergiquement, comme le chlore, sur les organes respiratoires; car une souris ne tarde à périr dans un air contenant $\frac{1}{6000}$ d'ozone [1]. On est parti de là pour instituer des observations régulières de l'ozone de l'atmosphère, et l'on a même cru remarquer une certaine coïncidence entre l'absence de l'ozone et la constitution médicale de certaines régions, pendant le règne de la dernière épidémie de choléra. Mais les expériences de M. S. Cloez montrent que les causes de la coloration du papier ioduré sont tellement nombreuses, qu'on ne peut rien conclure sur la présence ou l'absence de l'ozone [2]. Ainsi, il a constaté que les exhalaisons des végétaux qui donnent des huiles essentielles à la distillation, comme les arbres résineux, des traces d'acide azotique ou d'acide hypo-azotique, bleuissent rapidement le papier ioduré.

[1] *Bibliothèque de Genève* (Archives des sciences), t. XVIII, p. 194.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. L, p. 80.

Les essences de térébenthine, de citron, de menthe, de lavande mêlées à l'air, produisent les mêmes effets ; récemment distillées, elles n'agissent pas quand elles n'ont pas eu le contact de l'oxygène. Enfin, l'air humide agit sous l'influence d'une vive lumière : deux éprouvettes renfermant des bandes de papier ioduré ayant été suspendues sous une cloche pleine d'air humide et exposée aux rayons solaires, le papier resta blanc dans l'une d'elles qui était enveloppée de papier noir, et devint bleu dans l'autre, qui était transparente.

Les observations ozonométriques ne pourront donc avoir d'utilité qu'autant qu'on saura tenir compte des causes nombreuses qui peuvent agir sur le papier amidonné et ioduré, nommé improprement *réactif ozonoscopique*, puisqu'il peut se colorer sous diverses influences en l'absence de l'ozone.

V. Applications de l'électro-chimie. — Galvanoplastie.

1581. La *galvanoplastie* ou *galvanoplastique* est l'art de déposer sur des corps servant d'électrode négatif, les métaux contenus dans une dissolution traversée par un courant, soit en couche mince adhérente, pour protéger ces corps ou leur donner un nouvel aspect, soit en couche épaisse cohérente et susceptible de se détacher de l'électrode, qui est alors un moule, pour en reproduire les formes et les reliefs. Cette dernière espèce de dépôts est l'objet particulier de la *galvanoplastie* proprement dite, qui forme ainsi une branche de la galvanoplastie en général.

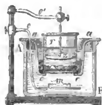
On avait remarqué, dès le temps de Volta, que les métaux déposés sur l'électrode négatif étaient parfois denses, cohérents, au lieu d'être pulvérulents comme cela a lieu ordinairement ; on l'avait vu prendre l'empreinte exacte des éraillures d'une lame de platine. M. de La Rive fit une remarque analogue, mais on n'avait tiré aucun parti de cette observation, lorsque, en 1837, M. Jacobi inventa, à Pétersbourg, la *galvanoplastie*, en remarquant aussi sur des dépôts de cuivre, la reproduction fidèle des plus petites irrégularités de l'électrode. Il opéra d'abord sur des planches de cuivre gravées, dont il prit l'empreinte, sur laquelle les traits en creux étaient reproduits en relief. Ayant pris celle-ci, à son tour, pour électrode négatif, il put reproduire une copie fidèle de la planche gravée en creux, et se servir de cette copie pour tirer des épreuves. Vers la même époque, M. Spencer, en Angleterre, imaginait d'employer les dépôts de cuivre pour reproduire des clichés ; mais tout ce qu'il a publié à ce sujet est postérieur aux communications officielles de M. Jacobi. Les premiers essais de M. Spencer ont été faits sur des caractères typographiques, dont il prit d'abord la contre-épreuve au moyen du dépôt de cuivre ; se servant ensuite de celle-ci comme moule, il obtint une copie exacte qui lui servit à imprimer un grand nombre d'exemplaires. Il expérimenta ensuite sur une médaille, et trouva que les plus fins détails étaient reproduits avec une perfection qui défiait l'examen microscopique le plus attentif.

Pour obtenir un dépôt de cuivre cohérent et malléable, *il faut* 1° *que le courant soit faible et d'intensité constante*, 2° que la dissolution de sulfate de cuivre soit toujours saturée, afin que, son pouvoir conducteur restant le même, la quantité d'électricité qui la traverse ne varie pas. On remplit cette dernière condition, en mettant dans la dissolution des cristaux de sulfate de cuivre, ou bien en prenant pour électrode positif une plaque de cuivre que l'acide mis en liberté dissout peu à peu, de manière à remplacer le sel qui a été décomposé. Cette première application de l'*électrode soluble* (1551) constitue un des principaux perfectionnements de la galvanoplastie, qui dès-lors se développa avec une rapidité croissante, particulièrement en France, et la pile, sortant des laboratoires, s'introduisit dans les ateliers, où elle rend chaque jour de nouveaux services aux beaux-arts et à l'industrie.

1582. Appareils. — On les divise en *appareils simples*, qui fournissent eux-mêmes l'électricité nécessaire à l'opération, et en *appareils composés*, dans lesquels on fait usage d'une pile proprement dite. Ces appareils ont été perfectionnés et modifiés de diverses manières ; ils ne présentent entre eux que des différences de détail. Il nous suffira donc d'en décrire quelques-uns.


Fig. 1170.

Appareils simples. — Ils consistent essentiellement en un vase divisé en deux par une cloison poreuse (*fig.* 1170) ; d'un côté, on met une solution de sulfate de cuivre, dans laquelle plonge le moule *m* de manière que la face à reproduire soit tournée du côté de la cloison ; dans l'autre compartiment, on verse de l'eau acidulée par l'acide sulfurique, et l'on y plonge une lame de zinc *z*, que l'on met ensuite en communication métallique avec le moule. L'action chimique exercée sur le zinc, développe de l'électricité, et le sulfate décomposé dépose son cuivre sur le moule. Une corbeille *c* contient des cristaux, destinés à entretenir la saturation. — Souvent, on se contente de plonger dans la dissolution de cuivre, un vase poreux rempli d'eau acidulée, et contenant un morceau de zinc qui communique avec le moule.


Fig. 1171.

Electrotype pour les médailles. — Quand on veut prendre l'empreinte de médailles, on se sert souvent du petit appareil de la *fig.* 1171 : un cylindre en verre *acca* s'appuie, par un rebord *aa*, sur le contour du vase AB rempli de la solution de sulfate de cuivre. Ce cylindre est muni à sa partie inférieure d'un autre rebord *cc*, sur lequel on appuie un second cylindre en verre *r*, fermé en bas par une membrane. Le cylindre *r*, contient de l'eau acidulée, dans laquelle plonge la lame de zinc *z*. Le moule *m* est placé horizontalement au-dessous de la membrane, et communique avec le zinc, par les tiges métalliques *o*, *o'*. On met des cristaux autour du cylindre *r*. — On peut remplacer le cylindre *acca*

par une tablette annulaire en bois soutenue par des montants qui vont s'accrocher au bord du vase AB.

Il faut, pour obtenir un dépôt bien malléable, que la surface du zinc diffère peu de celle du moule. Si la première est trop petite, le dépôt est cristallin; dans le cas opposé, il est pulvérulent et sans cohérence, inconvénient qui se présente aussi quand le zinc est trop vivement attaqué.

Appareils composés. — Une cuve en bois AB (*fig.* 1172) contient la dissolution de cuivre. Le moule *mm*, placé au fond, communique avec le pôle négatif d'une pile à courant constant P. La lame de cuivre *cc* forme l'électrode soluble; elle est soutenue par une toile *tt*, qui empêche les impuretés du cuivre *cc*, de tomber sur le moule.

La *fig.* 1173 représente une disposition avec laquelle on peut opérer sur plusieurs moules à la fois, quand ils sont assez petits pour être suspendus verticalement. On appuie sur les bords de la cuve AB, des baguettes métalliques *ab*, *ce*,

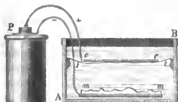


Fig. 1172.

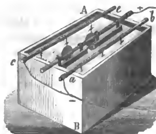


Fig. 1173.

communiquant avec le pôle négatif d'une pile, et auxquelles on suspend les moules. Une troisième baguette soutient une ou plusieurs lames de cuivre placées entre les deux séries de moules, et communiquant avec le pôle positif. Il est à remarquer que lorsque les moules sont placés verticalement, il se forme souvent, à l'extérieur du dépôt de cuivre, des stries verticales qui indiquent un défaut d'homogénéité, et sont occasionnées par les mouvements qui se produisent dans le liquide, dont l'homogénéité, sans cesse détruite, tend à se rétablir.

Les appareils composés permettent d'opérer sur des moules de grandeurs très différentes, en employant des piles à couples plus ou moins nombreux et plus ou moins grands. Il faut toujours que la surface du zinc de chaque couple soit en proportion avec celle du moule, et que le courant soit d'intensité constante. Les piles dont on fait usage ordinairement sont celles de Daniell et de Bagration. On préfère les piles à charbon, quand on veut faire passer le même courant à travers plusieurs appareils placés les uns à la suite des autres, ce qui exige une plus grande tension électrique.

1583. Dissolutions de différents métaux. — Le cuivre n'est pas

le seul métal employé dans la galvanoplastie. L'or, l'argent, le platine donnent aussi de bons résultats. Pour le cuivre, on emploie le sulfate de cuivre en beaux cristaux, que l'on dissout à saturation à froid. Si la dissolution était tout à fait neutre, le dépôt serait cristallin ; c'est pourquoi on y mêle un peu d'acide sulfurique. Pour l'or et l'argent, on se sert le plus souvent d'un mélange de 1 partie de chlorure d'or ou d'argent, et de 10 parties de cyanure de potassium dissous dans 100 parties d'eau. Pour le platine, on emploie le double chlorure de platine et de potassium. On a aussi cherché à déposer le zinc, le plomb, l'étain. Pour le premier, on emploie le sulfate ; pour le second, l'acétate très étendu et acidulé ; pour le troisième, une dissolution d'étain dans l'eau régale, acidulée par l'acide nitrique. Mais ces métaux, surtout les deux derniers, forment difficilement des dépôts convenables. On a enfin tenté de déposer des alliages, par exemple du bronze, en mêlant des dissolutions des métaux qui doivent entrer dans la composition de l'alliage ; mais on n'a pu obtenir jusqu'à présent que des produits cassants ou sans consistance.

1584. Des moules. — Les moules sont faits avec des métaux ou avec des substances non métalliques. Les moules en métal se font souvent par dépôt électro-chimique de cuivre sur l'objet lui-même. On a ainsi une contre-épreuve, dans laquelle on dépose de nouveau du cuivre pour obtenir une copie de l'objet. On fait encore des moules en plomb, soudure des plombiers, alliage fusible de d'Arcet, alliage d'imprimerie : on coule l'alliage sur une surface horizontale, et l'on applique dessus l'objet à mouler. Enfin, quand cet objet est dur et résistant, comme une médaille, on peut en prendre l'empreinte par une forte pression sur du plomb bien décapé. Avec les moules métalliques, on a à craindre l'adhérence du dépôt. Pour éviter cet inconvénient, on graisse légèrement la surface, ou bien on la saupoudre de plombagine en poudre impalpable. M. Spencer la lave avec une eau alcaline. On peut encore l'exposer à la vapeur de l'iode, comme pour préparer une plaque daguerrienne. Enfin, M. Boquillon a imaginé de la plonger un instant dans la fumée d'une flamme de résine, qui dépose une couche blanchâtre presque imperceptible ; c'est ce qu'on appelle *voiler* le moule. Le côté qui ne doit pas recevoir de cuivre est recouvert d'une couche de cire : et, s'il y a lieu, un rebord en carton ou en plomb limite le contour du dépôt.

Les moules non métalliques étant mauvais conducteurs, on rend leur surface conductrice au moyen d'argent, ou mieux de plombagine, en poussière impalpable, que l'on applique en couche imperceptible, au blaireau ou à la brosse. C'est ce qu'on appelle *métalliser* la surface. Ces moules se font en plâtre, que l'on rend ensuite imperméable par l'immersion dans la stéarine fondue ; en cire d'Espagne, cire d'abeille, stéarine, gélatine. Le soufre donne des empreintes très fidèles, mais il faut le recouvrir d'une couche de vernis pour l'empêcher de s'unir au métal qui se dépose. M. Gueyton, qui a beaucoup perfectionné les procédés galvanoplastiques, fait des moules en gutta-percha. Cette substance convient surtout aux objets en ronde bosse, sa flexibilité se prêtant facilement

à la dépouille, dans les parties qui présentent des enfoncements. La stéarine éprouvant un retrait prononcé en se solidifiant, M. Blandely s'en est servi pour obtenir des réductions d'un modèle donné ; au moyen de moulages successifs, il finit par obtenir un moule en stéarine de dimensions réduites, dans lequel les figures ont conservé leurs proportions relatives. Enfin, M. Mayo recommande comme donnant un moulage supérieur, un mélange de cire blanche et de blanc de plomb très fin ; et M. Lockey, un mélange de 1 partie de cire, 1 de stéarine et $\frac{1}{2}$ de plombagine en poudre. Cette dernière composition se moule très nettement, se détache d'elle-même au bout d'une demi-heure, et ne gâte pas le bronze des médailles.

1585. Applications diverses de la galvanoplastie. — La galvanoplastie sert journellement à reproduire en cuivre, or, argent, des médailles, timbres, cachets. Quand on veut reproduire une médaille, on prend d'abord la copie de ses deux faces, puis on soude ces deux pièces de part et d'autre d'un disque métallique d'épaisseur convenable.

Vases, statues, etc. — On applique la galvanoplastie à la reproduction des bas-reliefs, statues, vases, etc., avec une grande économie, et avec un fini, une fidélité de détails que l'art du fondeur ou du ciseleur ne peut obtenir au même degré. Pour les bas-reliefs de grandes dimensions et à fortes saillies, on arme l'électrode positif de prolongements qui s'enfoncent dans les cavités du moule pour y apporter l'électricité ; sans cette précaution, le courant passerait de préférence par les parties saillantes, et le dépôt n'aurait lieu que sur les reliefs, ou bien il y serait plus épais que dans les creux. C'est ainsi qu'ont été obtenus les bas-reliefs du piédestal de la statue de Guttenberg, à Strasbourg.

Pour les vases, les statuettes, on prend le moule, en deux ou plusieurs parties, avec du plâtre ou de la stéarine, on ajuste et on soude ces différentes parties avec de la cire, après les avoir *métallisées* en dedans, et on les plonge dans la dissolution, de manière que le liquide remplisse la cavité intérieure, dans laquelle on introduit l'électrode positif. Cet électrode envoie des ramifications dans les parties les plus enfoncées. On trouve aujourd'hui dans le commerce, une foule de statuettes, figurines, vases richement ornés, qui sont obtenus par ce moyen. Souvent la surface de ces objets d'art est dorée ou argentée par des procédés galvaniques, dont nous parlerons bientôt (1488).

Quand on veut opérer sur une grande statue, les différentes parties du moule en plâtre, rendues imperméables par la stéarine et métallisées en dedans, sont jointes avec soin, de manière à former une espèce de vase dans lequel on verse la dissolution, et par la surface intérieure duquel on fait arriver l'électricité négative. M. Christofle a reproduit ainsi le *Pensieroso* de Michel-Ange, statue de 3 mètres de hauteur,

Souvent on reproduit les grandes pièces, par parties que l'on soude ensuite à l'étain ou à l'argent, puis on recouvre chaque soudure avec du cuivre. Pour cela, on l'entoure d'un rebord en cire, de manière à former une espèce de

rigole, dans laquelle on verse une solution de sulfate de cuivre. On fait ensuite déposer le cuivre sur la soudure, au moyen d'un courant.

Electrotypie. — On donne ce nom à la partie de la galvanoplastie qui a pour objet la reproduction des planches gravées, des clichés, gravures sur bois, des caractères d'imprimerie. Nous avons dit (1581) comment on peut reproduire autant de fois que l'on veut une planche gravée sur cuivre, de manière que le tirage n'est plus limité à un certain nombre d'exemplaires par l'usure de la planche. On reproduit ainsi les planches en taille douce pour les estampes, les cartes géographiques, les billets de banque, les timbres-postes, les cartes à jouer. Les planches d'acier ne pouvant être plongées dans la dissolution de cuivre, on en fait la contre-épreuve en argent, sur laquelle on dépose ensuite le cuivre. On peut, du reste, obtenir cette contre-épreuve avec la cire ou le plâtre, ou bien encore au moyen d'une lame de plomb que l'on comprime sur la planche gravée, en les faisant passer ensemble entre les cylindres d'une presse à imprimer en taille douce. Ce procédé s'applique aux planches gravées sur cuivre. On en a aussi fait usage pour reproduire des feuilles de plantes, des fleurs....; on les place, entre une lame de plomb et une lame de cuivre, et l'on presse fortement; le plomb prend l'empreinte de ces objets, et sert de moule pour obtenir une contre-épreuve en cuivre, avec laquelle on se procure, par un second dépôt, la planche gravée en creux. Il est évident que les objets ainsi reproduits sont écrasés et déformés.

M. Smée a employé le courant de sa pile, pour obtenir des planches de cuivre pur, qu'il n'y a plus qu'à polir, pour les employer à la gravure au burin ou à l'eau forte, et qui sont bien préférables au cuivre du commerce, dans lequel on trouve souvent de l'étain ou d'autres métaux, qui trompent la main du graveur ou rendent l'action de l'eau forte irrégulière.

Quant à la reproduction des planches stéréotypées, des clichés, des caractères d'imprimerie..., l'industrie est en possession de moyens tellement économiques, que la galvanoplastie n'offre ici aucun avantage.

Galvanographie. — On dessine sur une planche de métal, au moyen d'une encre formée d'un mélange d'essence de térébenthine et de gomme laque, et l'on dépose sur cette planche une couche de cuivre, par le procédé galvanique. L'épaisseur des traits forme sous la couche déposée, des lignes en creux, de manière qu'on peut se servir de cette lame comme d'une planche gravée, pour tirer des épreuves. M. Hoffmann a trouvé une encre tellement liquide qu'on peut former des traits d'une finesse extrême, et obtenir des dessins d'une netteté remarquable. La *galvanographie*, imaginée vers 1840 par le prince de Leuchtenberg, présente plusieurs avantages : on n'a pas besoin de dessiner à rebours, et l'on peut corriger sans endommager la plaque [1].

Electro-tint. — Ce procédé galvanographique a été imaginé par M. Kobbeell, de Munich. On dessine sur une plaque de cuivre, au moyen d'un

[1] *Archives de l'électricité*, de M. A. de La Rive, t. II, p. 452.

vernis translucide qu'on applique au pinceau en couches plus ou moins épaisses, suivant les tons que l'on veut obtenir. On dépose ensuite une couche de cuivre sur ce dessin, et l'on a une planche gravée, dont on tire des épreuves qui présentent l'aspect d'un dessin au lavis.

1586. Gravure galvanique au pôle positif. — On a tiré parti de la dissolution de l'électrode *positif* pour graver de différentes manières des planches de métal. Voici comment M. Smée obtient la gravure en taille douce sur le cuivre. La planche étant recouverte d'une mince couche de vernis dans laquelle on a tracé avec une pointe les traits du dessin, il s'agit de creuser le métal partout où la pointe l'a mis à découvert. Au lieu d'opérer avec l'eau forte, M. Smée se sert de la planche pour électrode positif dans une dissolution de sulfate de cuivre. Le métal est dissous au fond des traits, et la planche se trouve gravée d'une manière plus nette et plus régulière que par l'eau forte, quand l'électrode négatif est de mêmes dimensions que la planche.

Le prince de Leuchtenberg a obtenu la gravure en relief sur une planche de cuivre, en la prenant aussi pour électrode positif, après l'avoir couverte de dessins, comme pour la galvanographie (1585); les parties recouvertes d'encre ne sont pas dissoutes et restent en relief. On est encore arrivé au même résultat en déposant, par électrolyse, de l'or au fond des traits tracés dans le vernis qui recouvre une planche de cuivre, enlevant le vernis, et faisant servir la planche, d'électrode positif. Les parties dorées ne sont pas attaquées et restent en relief.

Planches daguerriennes. — On a fait plusieurs tentatives pour graver les planches daguerriennes, de manière à pouvoir en tirer des épreuves à l'encre. Sur ces planches, dont la surface est en argent poli, les ombres du dessin sont produites par la surface brillante de l'argent, et les clairs, par des gouttelettes microscopiques de mercure, d'autant plus nombreuses que la teinte est plus claire. On a d'abord essayé de déposer une couche de cuivre sur la plaque ; on a alors une planche qui donne la contre-épreuve du dessin, les gouttelettes de mercure des parties claires formant des creux dans la couche déposée. Cette couche servant ensuite de moule, on obtient une planche donnant des épreuves semblables au dessin. Mais le peu de profondeur des creux fait que ces épreuves sont indécises. On a ensuite cherché à attaquer la plaque daguerrienne au moyen de l'eau forte; M. Berres, de Vienne, a le premier fait des essais dans cette direction. Enfin, M. Grove est parvenu à graver ces sortes de plaques en les faisant servir d'électrode positif, après avoir recouvert le contour et la face postérieure avec de la gomme laque [1]. Un mélange de 2 volumes d'acide chlorhydrique de densité égale à 1, 1, dans 1 volume d'eau, convient très bien pour cette opération; ce liquide attaque l'argent beaucoup plus que le mercure, de sorte que la planche donne immédiatement des épreuves directes. L'électricité négative arrive par une lame de platine de même grandeur que la plaque, dont

[1] *Archives de l'électricité*, de M. A. de La Rive, t. II, p. 457.

on la tient éloignée de 5 millimètres seulement, pour que l'action soit uniforme. Un seul couple à acide nitrique suffit, et l'opération ne doit pas durer plus de 30 secondes. La plaque est ensuite lavée à l'eau distillée; elle présente alors un beau dessin de couleur brune, produit par l'oxychlorure qui s'est formé. On enlève cette substance par un lavage dans de l'eau légèrement ammoniacale, et l'on peut ensuite tirer des épreuves à l'encre, ou prendre avec le cuivre, des copies galvanoplastiques de la planche. Pour donner une idée de la fidélité de reproduction à laquelle on arrive par ce moyen, M. Grove cite un écusson de $2^{mm},5$ de hauteur, sur lequel il y avait 5 lignes d'inscription qu'il pouvait lire très distinctement sur l'épreuve, au moyen d'un microscope.

1587. Galvanisation. — Au lieu de prendre copie d'un objet, on peut se contenter de le recouvrir d'une couche de métal assez mince pour ne pas altérer sensiblement les détails qui se montrent à sa surface, et assez épaisse pour ne pas se briser et se détacher par fragments. Ces objets sont alors dits *galvanisés*. On commence par *métalliser* leur surface au moyen de la plombagine, puis on les plonge dans la dissolution, en les faisant communiquer avec le pôle négatif d'une pile. On recouvre ainsi d'une couche de cuivre, d'argent, d'or, des plâtres, statuettes; des objets en osier, en verre, en faïence, des étoffes même. M. Soyer a présenté à l'Institut le cadavre d'un enfant nouveau-né recouvert d'une couche de cuivre, par ce procédé. — M. Oudry a revêtu d'une couche de cuivre de 1^{mm} environ d'épaisseur les fontaines en fonte qui décorent les Champs-Élysées et les places de Paris, entr'autres les fontaines colossales de la place Louvois et de la place de la Concorde; un enduit isolant sépare la couche de cuivre de la fonte, pour empêcher l'action galvanique des métaux en contact. — Des feuilles très finement découpées, comme celles du cerfeuil, du fenouil, recouvertes ainsi d'une couche d'argent ou d'or, forment des bijoux d'une délicatesse que l'art ne pourrait imiter que bien imparfaitement.

On peut déposer sur les corps, différents alliages, qui présentent assez de résistance parce qu'ils sont en couche mince. Mais il faut remarquer que les dissolutions ne doivent pas renfermer les métaux dans les mêmes proportions que l'alliage qu'on veut obtenir, à cause de l'influence des masses (1547); de plus, ces proportions dépendent de l'intensité du courant, et elles changent à mesure que le dépôt se forme. M. de Ruolz a recouvert des pièces de fer, d'un bronze semblable à celui des canons, au moyen d'une dissolution de cyanure de potassium, cyanure de cuivre et bioxyde d'étain. On peut recouvrir de laiton, le fer, la fonte, l'acier, le zinc, le plomb, l'étain et leurs alliages, au moyen de différents mélanges. MM. Brunel, Bisson et Gaugain ont indiqué une dissolution contenant 500 parties de carbonate de potasse, 20 de chlorure de cuivre, 40 de sulfate de zinc, 250 d'azotate d'ammoniaque. En substituant un sel d'étain au sulfate de zinc, on obtient un dépôt de bronze. On a recouvert, par ce moyen, de grandes statues en zinc, de manière à leur donner toute l'apparence de statues de bronze.

1588. DÉPOTS DE MÉTAUX EN COUCHES MINCES ADHÉRENTES. — DORURE. — Si le

hasard a été pour quelque chose dans la découverte de la galvanoplastie, on peut dire que l'art de dorer, argenter... au moyen de la pile, a été inventé à la suite de recherches directes, provoquées par le désir de substituer à la méthode meurtrière du mercure, des procédés n'offrant aucun danger pour la santé des opérateurs. On sait que pour dorer ou argenter par le mercure, on étend sur la surface bien décapée du cuivre, du bronze, une couche d'un amalgame d'or ou d'argent; on chauffe pour faire évaporer le mercure, et le métal précieux reste adhérent à la surface. Or, la présence des vapeurs de mercure est un danger pour la santé et même pour la vie des opérateurs, danger que les fourneaux perfectionnés de d'Arcet n'ont pu faire disparaître entièrement, à cause de l'insouciance des ouvriers, qui ne se conforment qu'avec répugnance aux précautions prescrites.

C'est en 1823 qu'eurent lieu les premiers essais de dorure galvanique; essais faits par M. de La Rive. Brugnatelli, dès 1805, avait bien doré de grandes médailles, en les tenant plongées dans une dissolution d'ammoniure d'or, pendant qu'elles communiquaient avec le pôle négatif d'une pile; et M. Becquerel, au milieu de ses recherches sur la réduction de divers minerais par l'électricité, avait aussi obtenu des dépôts métalliques adhérents, sur des corps conducteurs. Mais ces expériences n'avaient pas été l'objet d'applications industrielles. Les premiers essais de M. de La Rive ne le conduisirent d'abord qu'à dorer le platine; les autres métaux étaient attaqués par la dissolution, ce qui empêchait l'or d'adhérer. Plus tard, encouragé par les résultats obtenus dans la galvanoplastie, il reprit ses recherches et parvint à dorer l'argent et le laiton, par le moyen suivant : le métal à dorer était suspendu dans une dissolution neutre et très étendue de chlorure d'or renfermée dans un sac en vessie. Ce sac était plongé lui-même dans un vase de verre rempli d'eau légèrement acidulée avec de l'acide sulfurique, et entouré d'un manchon en zinc uni par un fil d'argent au métal à dorer, et destiné à fournir l'électricité. La dorure obtenue par ce moyen n'avait pas toute la solidité désirable; mais le principe était trouvé, et il n'y avait plus qu'à perfectionner, et surtout à trouver des dissolutions d'or plus convenables que le chlorure simple. M. Elsner fit faire un grand pas à la question, en découvrant que le défaut d'adhérence provenait de ce que le métal à dorer était attaqué par l'acide mis en liberté dans la dissolution. M. Bœttger ayant alors employé une dissolution de chlorure double d'or et de potassium, parvint à dorer le fer et l'acier. Au mois de janvier 1841, M. Perrot, de Rouen, présenta à l'Académie des sciences des objets en argent, cuivre, acier, fer, parfaitement dorés, et du fer recouvert d'une couche adhérente de platine, cuivre, zinc. C'est vers cette époque que nous trouvons les premières publications de M. de Ruolz, qui a posé le premier, d'une manière nette, les conditions d'une complète réussite. Connu comme compositeur de musique, il se fit industriel à la suite de revers de fortune, et

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LXXIII, p. 398.

chercha avec persévérance les moyens de dorer avec certitude par la pile. Il résolut complétement le probléme, découvrit plusieurs dissolutions remplissant les conditions nécessaires, et étendit le procédé à d'autres métaux que l'or : l'argent, le platine, le cuivre, le zinc, etc. Le Mémoire où il décrit ses procédés a été lu à l'Académie des sciences en août 1841. Au moment où il se proposait d'exploiter sa découverte, un industriel anglais, M. Elkington, exhiba un brevet pris en France pour la même invention, et antérieur de quelques jours à celui de M. de Ruolz. M. Elkington exploitait à Birmingham, depuis 1836, un procédé de dorure sans mercure, imaginé par M. Wright, et dit *dorure au trempé ;* mais ce procédé ne s'appliquant qu'aux alliages du cuivre, il fit de nouvelles recherches, à la suite desquelles il se trouva en possession de procédés semblables à ceux de M. de Ruolz. Les deux inventeurs eurent le bon esprit de s'associer pour exploiter conjointement leur découverte. Nous devons dire enfin que M. Boquillon a revendiqué de son côté la découverte de plusieurs conditions nécessaires au succés complet de l'opération.

1589. Dorure au trempé ou par immersion. — Ce procédé, dans lequel on n'emploie pas directement l'électricité, a été exploité, dès 1836, par M. Elkington ; il ne convient qu'au cuivre et à ses alliages. Depuis longtemps, les horlogers doraient, par un procédé semblable, de petites pièces de cuivre et même d'acier, en les plongeant dans une solution bien neutre de chlorure d'or ; mais l'acide mis en liberté par le dépôt de l'or, déterminait une oxydation, dont les effets ne tardaient pas à se montrer. Pour éviter cet inconvénient, il fallait employer une dissolution renfermant un alcali qui pût neutraliser l'acide abandonné par l'or. On connaissait, depuis Macquer, la dissolution de l'or dans les carbonates alcalins ; et Proust, puis Pelletier et Duportal, purent dorer avec une semblable dissolution ; mais aucun d'eux ne pensa à faire passer ces expériences dans le domaine de la pratique ; c'est ce qu'a fait le premier M. Elkington. Voici comment il prépare le bain d'or : on dissout 155 gr. d'or dans un mélange formé de poids égaux à 435 gr., d'eau, d'acide azotique ayant pour densité 1,45, et d'acide chlorhydrique ayant pour densité 1,15 ; on chauffe pour clarifier, on décante et on verse dans un vase de fer. On étend de 18 litres d'eau, on ajoute 9 kil. de carbonate de potasse, et l'on fait bouillir pendant deux heures. Le bichlorure d'or se transforme alors en protochlorure, ce que l'on reconnaît à la teinte verdâtre que prend la dissolution. Du sel d'oseille et d'autres matières organiques ajoutées au mélange, favorisent la réaction ; il en est de même des impuretés que peut contenir le carbonate de potasse. La qualité principale de cette dissolution est d'être alcaline, de sorte que le cuivre ne peut être attaqué par l'acide mis en liberté.

Pour dorer du cuivre ou du laiton, il suffit de les plonger dans la dissolution bouillante, et l'opération est terminée en un instant. On lave ensuite à grande eau, et l'on sèche dans la sciure de bois chaude. Ce procédé ne donne qu'une dorure très faible, qui serait bientôt usée par le frottement ; elle ne peut donc remplacer la dorure au mercure. Tandis que celle-ci dépose de 50

à 250 milligrammes d'or par décimètre carré, la dorure au trempé n'en précipite que 27 à 42.

M. Becquerel a obtenu par simple immersion, des dépôts en couche mince adhérente, de métaux autres que l'or : platine, argent, cobalt, nickel, palladium, iridium, cuivre, antimoine, bismuth, étain, plomb [1]. Il se servait, comme pour la dorure au trempé, du double chlorure alcalin du métal à déposer, et il opérait à des températures variant de 60 à 100°. L'opération était conduite de la même manière que pour dorer. Les métaux sur lesquels les dépôts ont été faits, sont le cuivre, le laiton, le maillechort et le fer.

1590. Dorure galvanique. — La dorure galvanique offre l'avantage de pouvoir s'appliquer sur toutes sortes de métaux, et en couches aussi épaisses que l'on veut. Les dissolutions dont on fait usage ordinairement, sont les doubles cyanures alcalins. On emploie, le plus souvent, un bain formé de 1 partie de chlorure d'or, et de 2 parties de cyanure simple de potassium dissous dans 100 parties d'eau. M. Becquerel signale aussi les borates comme donnant une bonne dorure, et M. Roseleur, les hypophosphates.

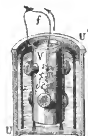


Fig. 1174.

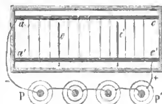


Fig. 1175.

Appareils. — Tantôt on opère avec des *appareils simples*, tantôt avec des *appareils composés*. Avec les premiers, on dispose l'expérience comme le faisait M. de La Rive (1588); seulement la vessie est remplacée par un vase poreux. Comme ce dernier laisse passer, par endosmose, un peu de la dissolution d'or, il est préférable d'employer la disposition suivante : V (*fig.* 1174) est un vase en porcelaine muni de plusieurs tubulures. Chaque tubulure est bouchée avec du kaolin humide, ou de l'argile dépouillée de carbonate de chaux, retenus à l'extérieur par un linge. Le vase V reçoit la dissolution d'or et l'objet à dorer *o*. Ce vase est plongé dans un autre vase UU' rempli d'eau acidulée, et enveloppé d'un manchon en zinc *z* qui fournit l'électricité, et est uni par un fil métallique *f* à l'objet à dorer.

La *fig.* 1175 représente un *appareil composé*. PP' est la pile, formée ordinairement de 5 ou 6 couples de Daniell. La dissolution est contenue dans une grande cuve en bois, traversée par deux tiges dorées *ac*, *a'c'*, placées un peu au-dessous du niveau. L'une *a'c'*, communique avec le pôle positif et soutient des lames d'or o', *o'*, qui servent d'électrodes solubles; l'autre, *ac*, communique avec le pôle négatif. Des fils, communiquant métalliquement avec *ac*, sont tendus

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XVIII, p. 449.

entre les deux tiges et servent à suspendre les objets à dorer. Les appareils composés sont préférables aux appareils simples, parce qu'ils permettent de régler la force du courant d'après la température, l'état de concentration du bain, et surtout le nombre et la grandeur des objets à dorer.

Dérochage et décapage. — Il faut commencer par *dérocher* la pièce à dorer, ce qui consiste à la débarrasser des matières grasses, par la calcination; puis on la *décape* en la trempant dans divers acides, pour détruire l'oxyde qui s'est formé. Souvent on emploie pour cela un mélange d'acide sulfurique et d'acide nitrique, auquel on ajoute de la suie, du sel marin; on lave à l'eau, et l'on sèche dans la sciure de bois chaude. Quand on le peut, on décape à sec, avec l'émeri ou la pierre ponce. Quelquefois on amalgame légèrement la surface, en trempant dans du nitrate de mercure, puis frottant avec une peau très douce, pour étendre le mercure, dès que la surface est blanchie. En général, la dorure est mate ou brillante, suivant que la surface est elle-même mate ou polie. Cependant la dorure est toujours mate quand la couche est épaisse; il faut alors la brunir par les procédés ordinaires, en la frottant avec un corps dur et poli.

Conditions de succès. — La première condition pour avoir une couche adhérente, est d'employer une dissolution *alcaline*, et c'est même en cela que consiste la découverte de MM. de Ruolz et Elkington. Cette condition remplie, l'adhérence est d'autant plus grande que le courant est plus faible, et la dissolution plus étendue. Il résulte des expériences de la commission de l'Académie des sciences qui a examiné les mémoires de MM. de La Rive, de Ruolz et Elkington, que l'épaisseur de la couche d'or est proportionnelle, toutes circonstances égales d'ailleurs, à la durée de l'opération [1]. Il est donc toujours facile de savoir, à chaque instant, à quelle épaisseur on est arrivé, quand on a une fois constaté le poids d'or qui se dépose dans l'unité de temps sur un décimètre carré. L'opération marche plus vite à chaud qu'à froid, et la rapidité ne dépend pas de la nature du métal à dorer.

Applications de la dorure galvanique. — On peut dorer par ce moyen l'argent, le platine, l'étain, le cuivre et ses alliages. Le fer et l'acier doivent être recouverts d'abord d'une mince couche de cuivre, ce qui se fait en les plongeant dans du sulfate de cuivre. Les ustensiles des laboratoires, les instruments de chirurgie peuvent être ainsi préservés de l'oxydation. Des creusets, des capsules en cuivre, dorés fortement en dedans, peuvent remplacer les même objets en or. On peut dorer seulement quelques parties des surfaces, en faisant des *réserves*, au moyen d'un vernis, sur celles qui ne doivent pas recevoir d'or, et on peut ainsi obtenir des effets très variés. M. Hammann a imaginé de dorer les planches de cuivre à graver, au lieu de les couvrir de vernis; les traits formés dans la couche d'or, par la pointe avec laquelle on dessine pour découvrir le cuivre, sont plus déliés que dans le vernis, et comme la couche

[1] *Comptes-rendus de l'Acad. des sc.*, de Paris, t. XIII, p. 998.

d'or est permanente, il est toujours possible de corriger la planche après qu'on a tiré des épreuves à l'encre.

1591. Dépôt de différents métaux. — Une foule de métaux peuvent être déposés, comme l'or, en couche mince adhérente, et le dépôt se fait suivant les mêmes lois. L'argent se précipite un peu plus lentement que l'or, et s'applique sur les mêmes métaux. Le bain est un double cyanure d'argent et de potassium, composé comme le double cyanure qui sert à dorer. On fait des couverts en fer, en maillechort, etc., qui argentés, présentent extérieurement l'aspect et les qualités de l'argenterie véritable. — Le *platine* se précipite avec une grande lenteur quand on emploie le double cyanure; mais l'opération marche aussi rapidement que pour l'or, quand on se sert du chlorure double de platine et de potassium dissous dans la potasse caustique; le platine préserve le fer, l'acier, le cuivre, de l'oxydation, et les applications qu'on en peut faire aux armes, aux ustensiles des laboratoires, aux pièces d'horlogerie..., sont d'autant plus importantes que la couche de platine coûte à peine plus que l'argent, parce qu'elle n'a pas besoin d'être aussi épaisse. — Le *cuivre* se précipite plus difficilement que les métaux précieux. Au moyen du double cyanure de cuivre et de potassium, on le dépose sur la fonte, la tôle. — Le *plomb* se dépose facilement sur le fer, la fonte et les autres métaux, au moyen d'une dissolution d'oxyde de plomb dans la potasse. Des chaudières de tôle plombée peuvent remplacer avec avantage les chaudières en plomb. — L'*étain* s'applique facilement sur le fer, le cuivre, le laiton, et la pile fournit ainsi un moyen d'étamage prompt et facile; on emploie une dissolution d'oxyde d'étain dans la potasse. — Le *zinc* déposé sur le fer, le préserve, même quand la couche est entamée; car il y a alors une action galvanique qui fait que toute l'oxydation tend à se porter sur le zinc qui est plus oxydable que le fer, et le zinc est préservé lui-même par la première couche de sous-oxyde insoluble qui se forme à sa surface. On fait aujourd'hui un grand usage, sous le nom de *fer galvanisé*, d'objets en fer recouverts d'une couche de zinc. Cette industrie importante a été créée, avant les publications de M. de Ruolz, par M. Sorel, qui employait le sulfate de zinc. La dissolution d'oxyde de zinc dans la potasse convient tout aussi bien. Pour les objets grossiers, on peut se contenter de plonger le fer bien décapé, dans du zinc en fusion; mais pour les objets délicats, la tôle mince, les objets d'art en fonte, les toiles métalliques..., il est nécessaire d'employer les procédés galvaniques. Les boulets de canon recouverts d'une couche do zinc sont préservés de l'oxydation, surtout en mer. On peut enfin déposer des couches minces de *cobalt*, *nickel*, et même de certains alliages, en prenant les précautions indiquées plus haut (1587).

1592. DÉPOT D'OXYDES PRÉSERVATEURS. — Quand on se propose de préserver les métaux oxydables, au lieu de les recouvrir d'une pellicule d'or, de platine, ou d'un métal non oxydablo, il est très avantageux de les envelopper d'une couche d'un oxyde inaltérable, comme le peroxyde de plomb, et surtout le

peroxyde de fer, qui, résistant aux températures les plus élevées, peut servir à préserver de l'oxydation les pièces de fer qui s'usent si rapidement sous l'action du feu. M. Becquerel a publié, en 1843, la solution de cette question [1]. La première condition que doit remplir l'oxyde déposé, c'est d'adhérer fortement au métal, quoique ce dernier soit oxydable; les dissolutions des oxydes dans les alcalis conviennent seules pour que cette condition soit réalisée.

La dissolution de plomb s'obtient en faisant bouillir 150gr de litharge dans 2 litres d'eau renfermant 200gr de potasse caustique. Quand le liquide est refroidi, on l'étend de son volume d'eau, et on le verse dans un vase poreux dans lequel on suspend le métal à recouvrir, après l'avoir bien décapé à sec, et adouci à la lime et à la ponce. Le vase poreux est plongé dans de l'eau acidulée par $\frac{1}{20}$ de son poids d'acide nitrique; une lame métallique fait communiquer ce liquide avec le pôle *négatif* d'un couple à courant constant, dont le pôle *positif* communique avec le métal à recouvrir. L'eau est décomposée, et son oxygène s'unit au protoxyde de plomb qui s'est porté sur le métal, de manière que ce dernier n'est pas oxydé, et se trouve recouvert au bout de quelques minutes d'une couche de peroxyde de plomb d'un brun foncé, assez adhérente pour supporter le frottement du brunissoir.

La dissolution de fer s'obtient en faisant chauffer du protosulfate de fer dans de l'ammoniaque; on enlève l'air en faisant le vide, et on la conserve dans des flacons bouchés à l'émeri. On opére ensuite comme avec la dissolution de plomb; et la réaction est la même. Le dépôt est d'abord brun rouge, puis il se fonce et prend, au bout de plusieurs heures, la teinte foncée qui constitue le violet de mars des peintres. Mais les couches foncées n'ayant pas d'adhérence suffisante, il faut s'arrêter dès que la couche rouge apparaît, ce qui a lieu au bout de quelques minutes. Sur les métaux dont les oxydes sont solubles dans l'ammoniaque, comme le cuivre, le dépôt n'est pas adhérent, l'oxygène de l'eau étant employé en partie à les oxyder.

1593. Coloration des métaux par le peroxyde de plomb. — M. Becquerel est parvenu à déposer sur divers métaux, sous l'influence d'un courant, du peroxyde de plomb en couche adhérente, assez mince pour présenter des couleurs vives, qui dépendent de l'épaisseur de la couche [2]. Ces couleurs ont quelque analogie avec les anneaux irisés de M. Nobili (1560); mais elles ne s'effacent pas par un léger frottement, comme ces derniers. Voici comment on les obtient : on verse dans un large vase de verre une dissolution de potasse saturée de peroxyde de plomb; on y plonge l'objet à colorer, et on le fait communiquer, par un ou plusieurs points, avec le pôle positif d'une pile. Le pôle négatif est armé de fils de platine que l'on présente à différents points de la surface, et qui sont enveloppés de tubes de verre, de

[1] *Comptes-rendus de l'Acad. des sc.* de Paris, t. XVII, p. 1 et 53., et XVIII, p. 197.

[2] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XVIII, p. 5.

manière à ne laisser sortir l'électricité que par leur extrémité. En les déplaçant convenablement, on modifie à volonté l'épaisseur du dépôt aux différents points, de manière à obtenir la nuance désirée. Au moyen de 6 couples de cuivre et zinc amalgamé chargés avec de l'eau faiblement acidulée, l'opération est terminée en une ou deux minutes. On lave ensuite à grande eau, et l'on sèche. D'après M. Becquerel, la dissolution est un plombate de potasse, et l'oxyde de plomb se dépose sur l'électrode positif en passant à l'état de peroxyde, aux dépens de l'oxygène de l'eau décomposée. Quand le courant est trop fort, on a un dépôt jaune non adhérent, que M. Becquerel regarde comme formé de peroxyde combiné avec un équivalent d'eau.

L'or, l'argent, le platine, le cuivre, l'acier, le maillechort..., peuvent ainsi recevoir les couleurs les plus vives; la nuance dépend de l'épaisseur de la couche, et aussi de la couleur du métal; car le dépôt est tellement mince, qu'il est transparent. Le succès tient surtout au soin que l'on apporte à rendre bien nette la surface à recouvrir. L'or, le platine, le fer et l'acier sont simplement lavés à la brosse dans une eau alcaline; le cuivre et ses alliages sont décapés dans les acides, comme pour la dorure. Il faut éviter de toucher la surface avec les doigts. Malgré les précautions les plus minutieuses, l'opération peut manquer ; on plonge alors la pièce dans l'acide acétique, pour enlever la couche d'oxyde, et l'on peut ensuite recommencer.

Les couleurs dues à l'oxyde de plomb s'altèrent à l'air par l'action des exhalaisons acides ou ammoniacales, qui enlèvent de l'oxygène au peroxyde. Pour éviter cet inconvénient grave, M. Becquerel recouvre la pellicule colorée, d'un vernis saturé d'oxygène. Pour préparer ce vernis, on chauffe modérément pendant deux heures dans un pot vernissé, un demi-litre d'huile de lin mêlée avec 4 à 8 grammes de litharge et 2 grammes de sulfate de zinc; on filtre ensuite, pour séparer l'excès de litharge. Ce vernis s'applique simplement au pinceau. S'il était trop épais, on y mêlerait de l'essence de térébenthine, purifiée de tout acide en la faisant bouillir sur de la litharge.

VI. Applications diverses. — Actions lentes produites par les courants très faibles.

1594. Nous venons de décrire les applications que l'on fait de la précipitation électro-chimique des métaux ou de leurs oxydes. L'électricité peut encore produire d'autres effets quand elle agit très faiblement pendant un temps très long; elle peut alors précipiter des substances qui ne peuvent l'être par des courants à forte tension, et produire des *combinaisons* inconnues dans les laboratoires de chimie, mais que la nature, qui dispose d'un temps illimité, offre toutes formées à l'étude du minéralogiste. M. Becquerel, qui s'est le premier livré à des recherches suivies sur les actions lentes de l'électricité, est parvenu à obtenir un grand nombre de composés curieux, et à lever ainsi un

coin du voile qui cache leur mode de formation dans le sein de la terre [1]. Nous allons citer quelques exemples, susceptibles de donner une idée des différentes méthodes employées dans ce genre de recherches. Commençons par la précipitation de corps simples.

Silicium. — Davy ne put décomposer la silice au moyen d'une pile à très forte tension ; M. Becquerel en a séparé le silicium par le moyen suivant : deux tubes verticaux (*fig.* 1176) plongent dans un flacon plein d'eau salée; ils sont bouchés à leur partie inférieure avec de l'argile imbibée d'eau salée, et retenue par un linge. L'un des tubes est rempli de silice en gelée dans de l'acide chlorhydrique du commerce, qui contient un peu de fer. L'autre tube est rempli d'une dissolution saturée de sel marin. Dans ce dernier plonge une lame de zinc *l*, et dans l'autre une lame de platine *l'*. On fait communiquer ces deux lames, à l'extérieur, au moyen d'un fil métallique; alors l'acide chlorhydrique est décomposé, l'hydrogène à l'état naissant décompose la silice et l'oxyde de fer, et il se dépose de petites lamelles de siliciure de fer, puis des lamelles de silicium qui conservent leur éclat tant que dure le courant. Si le courant cesse, elles sont promptement dissoutes. Quand on veut les conserver, on les retire rapidement du tube, on les lave, on les fait sécher dans le vide, et on les introduit avec du potassium, dans un tube qu'on scelle à la lampe.

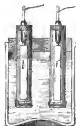


Fig. 1176.

Aluminium. — Ce métal, qui ne peut être séparé directement de l'alumine par un courant à forte tension, peut être précipité par de très faibles courants. M. Becquerel verse dans un tube en U dont les deux branches sont séparées par de l'argile humide, d'un côté une dissolution concentrée de chlorure d'aluminium dans laquelle s'enfonce une lame de platine, et de l'autre de l'eau salée, avec une lame de zinc. Les deux lames étant unies par un fil métallique, le platine se recouvre peu à peu de cristaux d'aluminium contenant un peu de fer. Le *magnésium*, le *zirconium* ont été précipités par le même moyen.

Arbre de saturne. — On remplit un flacon, d'une dissolution limpide d'acétate de plomb. Au bouchon, est fixée une lame de zinc à laquelle on accroche plusieurs fils de laiton qui plongent, ainsi que le zinc, dans la dissolution. Le bouchon est luté avec soin avec de la cire. Le zinc et le laiton forment un couple; le zinc attaqué prend l'électricité négative et la transmet au laiton, et le fluide positif se répand dans le liquide, de manière à former un courant qui va du zinc au cuivre. Ce courant décompose l'eau, et l'hydrogène transporté sur le cuivre, réduit l'oxyde de plomb et précipite le métal sous forme de lamelles brillantes, qui apparaissent à la partie supérieure des fils, se multiplient et grandissent, en formant des ramifications, nommées *arbre de saturne*, dont la disposition

[1] *Traité d'électro-chimie*, et *Annales de chimie et de physique*, *passim*.

dépend de celle des fils. L'acétate de plomb est transformé en acétate de zinc. Cette expérience est très ancienne.

Protoxyde de cuivre. — On introduit au fond d'un tube de 4 à 5^{mm} de diamètre (*fig.* 1177), une couche de bioxyde noir de cuivre, sur laquelle on verse une dissolution saturée d'azotate de cuivre ; on y plonge une lame de cuivre dont l'extrémité s'enfonce dans le bioxyde, et l'on ferme hermétiquement le tube. Au bout de quelques jours, on aperçoit sur la partie de la lame qui ne touche pas le bioxyde, de petits cristaux octaédriques de protoxyde de cuivre d'un rouge de rubis, qui finissent par avoir 1 ou 2 millimètres de côté. Ici, l'électricité est dégagée par la réaction de l'azotate de cuivre saturé, sur une couche moins saturée qui touche le bioxyde, lequel, en formant un sous-azotate, a diminué la quantité d'azotate neutre des couches contiguës.

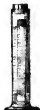


Fig. 1177.

Le protoxyde de plomb peut s'obtenir par un moyen semblable : on met au fond du tube, de la litharge en poudre, et au-dessus, une dissolution de sous-azotate de plomb.

Carbonate double de cuivre et de soude ou potasse. — Dans l'une des branches d'un tube en U, on verse une solution de bi-carbonate de potasse, et dans l'autre, une solution de sulfate de cuivre ; les deux solutions sont séparées par de l'argile. On plonge ensuite, dans les deux branches, les extrémités d'un arc en cuivre. Le cuivre se précipite sur l'arc, dans la branche qui contient le sulfate, et l'acide sulfurique et l'oxygène sont transportés dans l'autre branche, où il se forme du sulfate de potasse et de l'oxyde de cuivre, puis un carbonate double de potasse et de cuivre.

Carbonate de cuivre ou malachite. — Aprés avoir obtenu le double carbonate de potasse et de cuivre comme ci-dessus, on remplace la solution de carbonate de potasse par de l'eau pure ; l'acide sulfurique continuant à arriver, s'empare de la potasse du carbonate de potasse, chasse l'acide carbonique, qui s'unit à l'oxyde de cuivre formé d'abord, et donne naissance à du carbonate de cuivre ; ce carbonate, joint à celui qui s'était formé pendant la première partie de l'opération, apparaît sous forme d'aiguilles satinées d'un beau vert bleuâtre. Il faut arrêter l'opération avant que toute la potasse ne soit saturée ; car alors l'acide sulfurique agirait sur le carbonate de cuivre. Cette manière d'opérer en deux temps est trés féconde en résultats.

Aluminate de chaux. — On a trois vases réunis deux à deux par des tubes en siphon contenant une mèche de coton mouillée. Les deux vases extrêmes sont remplis, l'un d'une solution concentrée de chlorure de calcium, l'autre d'une solution de chlorure d'aluminium. Le vase du milieu est rempli d'eau mêlée d'un peu des deux chlorures précédents ; il reçoit une lame de cuivre, unie à des lames de zinc plongées dans les vases extrêmes. Il se forme de l'électricité au contact du zinc avec chacun des chlorures, et la chaux et

l'alumine transportées sur la lame de cuivre s'y rencontrent à l'état naissant, et se combinent en formant un dépôt d'aluminate de chaux.

Chlorure d'argent ou de cuivre. — Un morceau de cuivre ou d'argent est attaché avec un fil du même métal à un morceau de charbon, et plongé dans un tube rempli d'acide chlorhydrique, tube que l'on effile ensuite à la lampe. Au bout de quelques mois, on aperçoit des cristaux de chlorure sur la lame métallique. L'hydrogène de l'acide s'unit en même temps au charbon, et il se dégage par la pointe effilée, de l'hydrogène carboné.

Dernièrement, M. Becquerel a repris quelques-unes de ses expériences sur les produits obtenus par les actions lentes, en opérant à une température élevée et sous une pression plus ou moins forte, pour se rapprocher des conditions dans lesquelles certains minéraux ont dû se former dans la nature. Il a obtenu ainsi l'aragonite, la malachite, le cuivre carbonaté bleu en petits mamelons, des sulfures, iodures, bromures, cyanures métalliques cristallisés, etc. Il a reconnu que les actions lentes prennent une nouvelle activité sous les influences combinées de la chaleur et de la pression.

1595. Conservation du doublage des navires. — Le doublage en cuivre des vaisseaux est souvent corrodé avec une grande rapidité par l'eau de la mer. Davy a cherché à combattre cette action, au moyen des forces électriques ; il eut l'idée d'appliquer sur le cuivre, de distance en distance, des morceaux de métal plus oxydable, comme le zinc, la fonte de fer. Le résultat répondit à son attente. Voici comment cela s'explique dans la théorie électro-chimique : l'action exercée par l'eau de mer sur le zinc ou le fer, développe de l'électricité ; le fluide négatif se porte sur le métal attaqué, et de là sur le cuivre, et le fluide positif passe dans l'eau. Ce liquide est donc traversé par un courant qui va du zinc ou fer, au cuivre. L'eau est décomposée par ce courant, et l'hydrogène transporté sur le cuivre en empêche l'oxydation. Des expériences multipliées ont montré que, pour que le cuivre soit complétement préservé, il faut que la surface du métal protecteur soit de $\frac{1}{40}$ à $\frac{1}{150}$ de celle du cuivre. Si la surface est moindre, le cuivre perd de son poids, d'autant plus qu'on a employé moins du métal préservateur. Malheureusement, il se présente un inconvénient qui a fait renoncer à ce procédé ; c'est que le cuivre se recouvre, surtout autour des plaques de zinc ou fer, des corps électro-positifs que renferme l'eau, comme les carbonates de chaux et de magnésie. Ces incrustations servent ensuite de réceptacle aux plantes marines, aux coquilles, et bientôt la marche du navire est entravée par cette enveloppe parasite, en même temps que son poids se trouve notablement augmenté. On pourrait peut-être obvier à cet inconvénient en mettant moins de zinc, de manière à permettre au cuivre de se corroder légèrement. Depuis on a reconnu que des plaques de bronze laminé remplacent le cuivre avec avantage et s'altèrent beaucoup plus lentement ; les métaux associés formant de petits couples qui sont en même temps trop rapprochés pour que les incrustations puissent se déposer. On a trouvé de ces doublages en

bronze encore en très bon état au bout de 10 ans de navigation. M. Bobierre a conclu de l'examen et de l'analyse de plaques de bronze prises sur plusieurs navires arrivant de voyage, que les feuilles, pour être peu altérables, doivent être d'une structure régulière et contenir une quantité suffisante d'étain intimement uni avec le cuivre.

CHAPITRE V.

DE L'ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE. — PROPAGATION, INTENSITÉ, PRODUCTION.

Dans ce chapitre, nous allons nous occuper de l'électricité dynamique considérée en elle-même ; de son mode de propagation ; de son intensité et de l'évaluation des éléments dont elle dépend, c'est-à-dire de la conductibilité des substances que parcourt le courant, et de la force électromotrice des piles qui le fournissent.

§. 1. — MODE DE PROPAGATION ET VITESSE DE L'ÉLECTRICITÉ.

1. Constitution du courant.

1596. Identité du courant dans tous les points du circuit. — Les effets que produit un courant sont les mêmes dans tous les points du circuit qu'il parcourt, quelles que soient la nature et les dimensions des corps qui composent ce circuit. Les lois de l'électrolyse (1563) démontrent qu'il en est ainsi pour les actions chimiques, dans le circuit extérieur et dans la pile même. Il en est de même pour les actions physiques et mécaniques, quand elles s'exercent dans les mêmes conditions. Ampère, dès 1821, avait prouvé cette identité d'action, dans la déviation de l'aiguille aimantée, et il avait montré que cette déviation est la même dans la pile qu'en un point quelconque du circuit extérieur. Un moyen de vérification très simple, consiste à replier le circuit sur lui-même, de manière que le courant marche en sens contraire dans deux portions parallèles très rapprochées : on voit qu'elles ne dévient pas l'aiguille aimantée. M. Becquerel a constaté l'égalité d'intensité dans tous les points du fil con-

jonctif, par le moyen suivant [1] : il soude en deux points quelconques de ce réophore deux bouts de fil égaux, et en deux autres points distants entre eux comme les deux premiers, deux autres fils semblables ; il met les deux premiers fils en relation avec l'un des fils d'un réomètre différentiel, et les deux autres avec le second fil de ce même réomètre, de manière que les courants détournés marchent en sens contraire, et il trouve que l'aiguille reste en repos. M. Pouillet a vérifié l'égalité d'intensité dans la pile et dans le circuit, sur la pile thermo-électrique placée dans le méridien magnétique ; et M. Fechner, sur des arcs métalliques réunissant deux à deux les couples d'une pile hydro-électrique. Le premier observait la déviation de l'aiguille, le second procédait par la méthode des oscillations. Enfin, M. de La Rive [2] a vérifié directement l'égalité d'intensité dans toutes les parties, liquides ou solides, d'un circuit, par la méthode suivante : il forme un circuit rectangulaire, au moyen de tubes de verre et de cylindres métalliques de différentes substances et de différents diamètres. Les tubes sont remplis de divers liquides, et certains cylindres sont terminés à un bout par du zinc, et à l'autre par du cuivre, de manière à former des éléments électromoteurs. L'expérience montre qu'une aiguille aimantée, délicatement suspendue à une même distance de l'axe d'une partie quelconque du circuit, accomplit toujours le même nombre d'oscillations pendant le même temps.

1597. Le courant passe également par tous les points de la section du réophore. — L'intensité d'un courant ne dépend pas de la surface du réophore, mais seulement de l'aire de sa section droite, ce qui montre que l'électricité ne se porte pas à la surface, comme dans l'état statique, mais qu'elle se propage par tous les points de la section. Pour prouver cette loi, on remplace une portion du fil cylindrique d'un circuit, successivement par un conducteur de même substance et de même longueur, mais dont la section, présentant toujours la même aire, affecte différentes figures, carrées, triangulaires, aplaties, etc. La déviation de l'aiguille aimantée reste toujours la même, quoique la surface extérieure soit très différente dans ces divers fils. On peut encore remplacer le fil par plusieurs fils réunis en faisceau, pourvu que la somme des aires de leurs sections soit égale à l'aire de la section du fil unique qu'ils remplacent. Ce résultat, établi par Davy et par Fechner, prouve que l'électricité dynamique a une tendance à se disséminer dans toute la largeur du conducteur. Cette tendance, constatée par M. de La Rive, en 1824, pour les solides, et en 1825 pour les liquides, est rendue plus évidente quand on fait passer le courant suivant la longueur d'une large bande de métal. On trouve qu'une aiguille aimantée très délicate oscille toujours dans le même temps, quelle que soit sa position au-dessus de la bande, pourvu qu'elle en soit toujours à la même distance, et que ses extrémités ne soient pas trop

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXXII, p. 428.

[2] *Traité d'électricité théorique et appliquée*, par A. de La Rive, t. II, p. 17.

près des bords. On peut encore appuyer en deux points quelconques de cette bande, les deux bouts du fil d'un réomètre ; si l'on fait en sorte que les deux points touchés soient sur des perpendiculaires à la longueur de la bande toujours également espacées, le réométro donne les mêmes indications.

Si la plaque n'avait pas une dimension plus grande que les deux autres, la diffusion se montrerait encore, mais l'intensité ne serait plus la même partout ; les lignes de même intensité présenteraient des formes ovales en formant une figure semblable à l'œuf électrique. M. Kirchoff a soumis au calcul la distribution de l'électricité dynamique passant entre deux points dans une plaque et dans un corps à trois dimensions. Nous verrons plus loin à quels résultats il est parvenu (1624).

M. de La Rive a constaté la diffusion des courants dans les liquides électrolysés. Pour cela, il fait arriver l'électricité dans un baquet rempli d'eau salée ou acidulée, par deux boules en platine de 1 centimètre de diamétre, soutenues par des fils enveloppés d'une couche isolante. Les boules sont situées sur un même diamètre du baquet, et à la même distance de l'axe. Les deux extrémités en platine du fil d'un réomètre, sont maintenues à une distance constante l'une de l'autre, et plongées, toujours à la même profondeur, en différents endroits du liquide ; la portion du courant qui traverserait l'espace compris entre les deux fils, passe ainsi dans le réomètre qui présente uno moindre résistance que le liquide, et l'on trouve qu'il y a des courants dans toutes les parties du liquide, même derrière les pôles. L'intensité est la plus grande sur la ligne qui joint les centres des électrodes, et va en diminuant sur cette ligne, de chaque boule au milieu de l'espace qui les sépare ; ce qui montre que les courants s'épanouissent, comme l'électricité dans l'œuf électrique. Du reste, cette diffusion des courants est d'autant plus prononcéo que le liquide est moins bon conducteur. M. Matteucci est arrivé aux mêmes résultats par une méthode semblable.

1598. Plusieurs courants peuvent se croiser sans se modifier. — M. Marianini a constaté cette loi en faisant passer deux courants à travers de l'eau acidulée, et en disposant les lignes des électrodes de l'un d'eux obliquement par rapport à la ligne des électrodes de l'autre. Même quand l'angle est très petit, et que l'un des courants est beaucoup plus fort que l'autre, on trouve que chacun d'eux agit de la même manière sur le réomètre quand il passe seul et quand il passe en même temps que l'autre. Trois courants perpendiculaires entre eux ne se modifient pas davantage. Il en est de même de plusieurs courants parallèles de même sens ou de sens contraires très rapprochés les uns des autres dans le même liquide, et provenant de piles distinctes. Enfin, si plusieurs courants parcourent en même temps le fil d'un réomètre, chacun d'eux agit comme s'il était seul. Pour s'en assurer, on fait passer un des courants seul, et l'on observe la déviation *d* qu'il produit ; puis on fait passer un second courant seul, et, en tournant convenablement le cadre du réomètre par rapport au méridien magnétique, on ramène l'aiguille au zéro ;

on fait alors passer le premier courant conjointement avec le second, et l'on trouve que l'aiguille donne de nouveau la déviation *d* [1].

1599. Etat de l'électricité dans les courants. — Les propriétés qui précédent sont incompatibles avec la supposition d'un transport réel des électricités à travers les conducteurs ; car, dans ce cas, il y aurait un écoulement d'électricité positive prés du pôle positif de la pile, et d'électricité négative, prés du pôle opposé. Au milieu du fil conjonctif, il y aurait l'état neutre, et il serait impossible de concevoir que les effets fussent les mêmes dans tous les points du circuit. On doit donc considérer d'une tout autre manière l'état de l'électricité dans un courant continu.

Voici comment on le conçoit aujourd'hui : les électricités qui se portent aux pôles de la pile décomposent par influence le fluide neutre des molécules les plus rapprochées, du fil conjonctif. Ces molécules ainsi polarisées agissent sur les molécules suivantes, qu'elles polarisent à leur tour, et ainsi de suite de proche en proche, comme dans les tubes étincelants. Cette polarisation a lieu dans les mauvais conducteurs comme dans les bons conducteurs (1353) ; mais dans les premiers, à moins de très grandes tensions, les électricités séparées dans les molécules ne peuvent en sortir en franchissant l'espace qui les sépare. Dans les bons conducteurs, au contraire, l'électricité passe facilement d'une molécule à l'autre en produisant des décharges, comme dans les tubes étincelants, et c'est par cette série de décharges que se propage l'électricité, comme nous avons déjà eu l'occasion de l'énoncer (1442). Nous avons une image fidèle de la diffusion des courants dans les larges conducteurs, par l'expérience des carreaux magiques (1286). Nous avons dit aussi comment M. Faraday explique, par la polarisation des molécules, le passage de l'électricité à travers les gaz, quand elle s'échappe par des pointes, en formant des aigrettes lumineuses ou invisibles (1287). Nous avons vu enfin, comment M. de La Rive rend compte, au moyen de ces décharges intermoléculaires, de l'échauffement des conducteurs traversés par les courants (1522).

Dans cette théorie de la propagation de l'électricité, on conçoit qu'il doit exister une résistance aux décharges intermoléculaires ; que cette résistance doit dépendre de la facilité avec laquelle la décomposition par influence se fait dans les molécules du corps, et de la distance de ces molécules; ce qui nous explique pourquoi la conductibilité varie d'une substance à une autre, et dans une même substance avec la température (1527). On conçoit aussi que l'électricité éprouvera d'autant plus de difficulté à passer, que la section renfermera moins de molécules, et que la longueur du conducteur sera plus grande; c'est, en effet, ce qui a lieu. Mais avant d'entrer dans l'étude de ces influences, nous allons chercher à nous rendre compte de la rapidité avec laquelle se propage l'électricité.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XLII, p. 131.

II. De la vitesse de l'électricité.

1600. L'électricité ne pénétre qu'avec une extrême lenteur dans les corps isolants (1349); aussi n'est-ce que sur les bons conducteurs qu'il est important de mesurer sa vitesse de propagation, vitesse qui est prodigieuse. Peu de temps après la découverte de la bouteille de Leyde, on chercha à reconnaître si l'électricité emploie un temps appréciable à se propager dans de longs circuits servant à effectuer la décharge. Deluc paraît avoir fait le premier des expériences à ce sujet; il se servait des tuyaux de conduite des eaux de Genève, et d'un fil d'archal isolé servant à compléter le circuit. Watson opéra, en Angleterre, en 1748, sur un circuit de 4 milles de long, 2 milles formés par le sol, et les deux autres par un fil métallique isolé au moyen de poteaux en bois sec. Ce fil était replié de manière que son milieu fût tout près de la bouteille; il y avait une interruption en ce milieu, et l'étincelle qui s'y produisait au moment de la décharge, paraissait toujours coïncider exactement avec celle qui jaillissait sur le bouton de la bouteille. De toutes ces expériences, on conclut que l'électricité se transmettait avec une rapidité trop grande pour pouvoir être mesurée. Cette opinion fut admise sans conteste jusqu'en 1834; alors M. Wheatstone publia une méthode ingénieuse et trés féconde, qui permet d'évaluer des durées de un millioniéme de seconde, et au moyen de laquelle il démontra que la propagation de l'électricité n'est pas instantanée[1].

1601. Expériences de Wheatstone. — Voici d'abord le principe de la méthode. Si l'on regarde dans un miroir l'image d'un point lumineux fixe, et si l'on fait tourner ce miroir autour d'un de ses diamètres, on voit l'image se déplacer, en décrivant un arc dont le centre est sur l'axe de rotation, et dont le plan est perpendiculaire à cet axe. Il résulte des lois de la réflexion de la lumière, que la quantité angulaire dont tourne l'image, est double de la quantité angulaire dont tourne le miroir. Si le point lumineux ne brille que pendant un instant, l'image paraîtra décrire un arc limité, d'autant plus grand que la vitesse de rotation du miroir sera elle-même plus grande. Si le point lumineux ne brille que pendant un temps excessivement court, on pourra encore distinguer un déplacement dans l'image, si le miroir tourne avec une trés grande rapidité. Mais, en même temps, l'impression faite au fond de l'œil, persistant pendant $\frac{1}{10}$ de seconde environ, on verra l'image simultanément dans toutes les positions qu'elle occupera successivement, pourvu que le phénoméne dure moins de $\frac{1}{10}$ de seconde, et l'on apercevra un arc ou trait lumineux dont la longueur sera proportionnelle à la vitesse du miroir, et au temps pendant lequel brillera le point lumineux.

[1] *Archives de l'électricité*, de M. A. de La Rive, t. II, p. 43.

Supposons maintenant que l'on fasse partir une étincelle électrique près d'un miroir tournant très rapidement, de manière qu'elle jaillisse au moment où le miroir lui présente sa surface réfléchissante; l'observateur placé près de l'étincelle verra simplement l'image de cette dernière, si elle n'a pas de durée; mais si elle a une durée suffisante, il verra un petit trait dirigé perpendiculairement à l'axe de rotation. C'est ce qui a lieu pour l'étincelle d'une bouteille de Leyde quand on la décharge par l'intermédiaire d'un long fil métallique, et que le miroir fait 600 à 800 tours par seconde. Cette étincelle a donc une durée appréciable.

Cela posé, considérons un long fil isolé ABCD (*fig.* 1178) : les parties ponctuées B et C indiquent la place de deux portions égales entre elles, ayant 402 mètres de longueur. Ce fil est interrompu au milieu *a*, et en *n* et *n'* tout près des armatures d'une bouteille de Leyde que l'on peut faire communiquer avec les extrémités A et D. Le système des boules *n*, *a*, *n'* est placé devant un miroir tournant, de manière que la ligne *nn'* soit parallèle à l'axe de rotation. Si l'on décharge la bouteille à travers ce système, il se produit trois étincelles *n*, *a*, *n'*, et si le miroir tourne lentement, on voit par réflexion trois points brillants, disposés parallèlement à l'axe. Si le miroir tourne de plus en plus rapidement, on finit par distinguer trois traits perpendiculaires à cet axe, présentant cette apparence ≡; puis l'image du milieu paraît en retard par rapport aux deux autres, et l'on a la disposition ≡, ou ≡, suivant le sens du mouvement. On peut déjà conclure de là : 1° que l'électricité emploie un temps appréciable pour parcourir les portions de fil B et C ; 2° que les étincelles *n*, *n'* partent en même temps, circonstance inconciliable avec l'hypothèse d'un seul fluide qui se transporterait de A en D, et qui est, au contraire, la conséquence même de la propagation de l'électricité par des décharges successives entre les molécules ; 3° que la vitesse de propagation ne dépend pas du sens du courant, puisque ce sens est différent en B et en C; jamais les images n'ont présenté la disposition ≡ ou ≡.

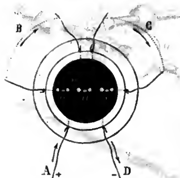


Fig. 1178.

Description de l'appareil. — Après divers essais, M. Wheastone a adopté l'appareil suivant (*fig.* 1179). M est un miroir d'acier poli de 2,5 centimètres de diamètre, tournant autour d'un arbre métallique *oo'* porté par un support massif en laiton AB, fixé sur une table épaisse Le mouvement est imprimé à l'arbre *oo'* au moyen d'une roue et d'une corde sans fin *rr*, qui embrasse la poulie *p*, dont le diamètre est 1800 fois plus petit que celui de la roue. La *table à étincelles* (*fig.* 1178) est fixée en face du miroir, de manière que la ligne *nn'*

soit dans le même plan horizontal que l'axe de rotation, et l'observateur est placé à une distance de 30 centimètres, sur la verticale qui passe par cet axe. Pour qu'il puisse apercevoir les images des trois étincelles, il faut qu'elles jaillissent au moment où le miroir est tourné de son côté et incliné de 45° sur l'horizon. Pour remplir cette condition, l'arbre *oo'* fait partie du circuit; le fil *f* communique avec l'armature extérieure de la bouteille de Leyde, qui est isolée, et le cylindre isolé E*e*, avec l'armature intérieure. Entre les deux, se trouve le fil conducteur, ayant au milieu la table à étincelles. La distance qui existe entre le conducteur E*e* et l'arbre *oo'* empêche la décharge d'avoir lieu; mais la petite boule métallique *a* fixée à l'arbre, la produit au moment où elle passe en face de la boule *e*. Pour rendre ce moment encore plus précis, une lame de mica *m* percée d'un petit trou, ne permet à l'étincelle de jaillir que lorsque le trou et les boules *e* et *a* sont en ligne droite. La bouteille de Leyde reçoit continuellement l'électricité d'une machine électrique en mouvement, de manière à donner plusieurs décharges en peu de temps, et à permettre de bien saisir les circonstances du phénomène. La boule *a'* est destinée simplement à faire contrepoids à la boule *a*.

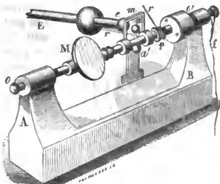


Fig. 1179.

La *table à étincelles* (*fig.* 1178) est formée d'une planche circulaire sur laquelle ont été isolées, en les noyant dans la gomme laque, les six extrémités des fils terminés par de petites boules faisant saillie en dehors. Leur distance, ou la longueur des étincelles, était de 2,5 millimètres. Les fils D et C étaient en cuivre; ils avaient chacun $\frac{1}{4}$ de mille, ou 402 mètres de longueur. Ils étaient suspendus par des cordons de soie dans une longue galerie, et repliés en dix parties parallèles.

Évaluation de la vitesse. — Les expériences qui précèdent prouvent bien que la propagation de l'électricité n'est pas instantanée; il restait à en mesurer la vitesse. Pour cela, il fallait connaître d'abord le nombre de tours que faisait le miroir par seconde, nombre qui était déduit du son engendré par le choc de la boule *b* (*fig.* 1179) contre l'angle d'une carte; puis évaluer en degrés la quantité dont s'avançait le trait du milieu par rapport aux deux autres. Cette dernière quantité paraissait égale à $2^{cm},5$, et comprenait au plus $\frac{1}{2}$ degré, pour une distance de l'œil au miroir égale à 3 mètres. Le miroir tournait donc de $\frac{1}{4}$ de degré pendant le temps qui s'écoulait entre la manifestation des étincelles extrêmes et l'apparition de celle du milieu. Or, le nombre de tours était de 800 par

seconde, ce qui équivaut à $800 \times 360 \times 4$ quarts de degrés; $\frac{1}{4}$ de degré était donc décrit en $\frac{1}{800 . 360 . 4} = \frac{1}{1152000}$ de seconde. Tel était donc le temps employé par l'électricité pour parcourir les 402 mètres de chacun des fils C et B. L'espace parcouru en 1^s eût été 1 152 000 fois plus grand, c'est-à-dire $1\,152\,000 \times 402 = 463\,104\,000^m$, on, en nombre rond, 463 000 kilomètres. Telle serait la vitesse minimum de l'électricité *dans des fils de cuivre.*

La longueur de chaque trait lumineux pouvait comprendre 24°, ce qui assigne une durée de $\frac{1}{24000}$ de seconde à l'étincelle. Mais il ne faut pas oublier que la décharge se fait à travers un long fil, qui, par sa résistance, ne peut laisser passer toute l'électricité en même temps (1332). Quand la décharge est produite par un arc gros et court, l'étincelle n'a pas de durée appréciable.

1602. Expériences faites avec l'électricité voltaïque. — Les expériences que nous venons de décrire ont été faites avec l'électricité de tension accumulée dans un condensateur; dans celles dont nous allons parler, on s'est servi de l'électricité fournie par la pile, en profitant des fils des télégraphes électriques. La première méthode, que l'on peut désigner sous le nom de *méthode des longitudes*, a été employée, pour la première fois, en 1849, par M. Walker, entre Philadelphie et Cambridge. L'électricité était lancée de l'une des stations, à travers un fil télégraphique, arrivait à l'autre station, et était ramenée au point de départ par un second fil. Si le fluide se transmettait instantanément, la différence entre les heures des deux stations au moment du passage de l'électricité, eût donné la différence des longitudes. Mais comme l'électricité arrivait à la seconde station quelques instants après être partie de la première, l'heure d'arrivée observée était un peu postérieure à celle qui avait lieu à cette station au moment du départ de l'électricité. La différence des longitudes calculée par ce moyen se trouvait donc erronée, et en la comparant avec la différence réelle, déterminée par les moyens astronomiques, il était facile d'évaluer l'erreur sur le temps, et, par conséquent, la fraction de seconde employée par l'électricité pour franchir l'intervalle entre les deux stations. Des expériences semblables ont été faites par M. O'Mitchell entre Cincinnati et Pittsburg. Cette même méthode a été appliquée plus tard par les astronomes des Observatoires de Greenwich et d'Edimbourg, puis par ceux de Greenwich et de Bruxelles, au moyen des fils télégraphiques établis entre ces stations.

En 1850, MM. Fizeau et Gounelle ont étudié la vitesse de l'électricité par une méthode toute différente, sur les fils télégraphiques qui s'étendent de Paris à Amiens, et de Paris à Rouen [1]. Le circuit de la ligne de Rouen était, partie en fer, partie en cuivre, ce qui a permis de comparer les vitesses de l'électricité dans ces deux métaux, et l'on a trouvé que la vitesse est environ de 100,000 kilomètres par seconde dans le fer, et de 180,000 dans le cuivre. En outre, cette vitesse a paru la même pour les deux électricités, et être indépendante de la section du fil, ainsi que du nombre et des dimensions des couples de la

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XXX. p. 437.

pile. M. Lartimer-Clark avait déjà trouvé que le nombre des couples de la pile n'a pas d'influence sur la vitesse, depuis 31 jusqu'à 500 couples.

La méthode employée par MM. Fizeau et Gounelle diffère peu de celles qu'employèrent, en 1854, MM. Guillemin et E. Burnouf dans des expériences faites sur la ligne télégraphique de Toulouse à Foix [1]. Voici quel est le principe de cette méthode : deux fils télégraphiques parallèles, réunis à l'une des stations, forment un seul conducteur isolé, dont les extrémités se trouvent à l'autre station. L'une de ces extrémités peut être mise en communication avec un des pôles d'une pile, et l'autre, avec l'un des bouts du fil d'un réomètre. L'autre bout du réomètre et le second pôle de la pile sont joints au sol. Si l'on fait communiquer *au même instant* l'une des extrémités du fil télégraphique, avec la pile, et l'autre avec le réomètre, l'électricité s'élancera dans le fil, et agira sur le réomètre, après avoir parcouru le circuit télégraphique. Mais si l'on interrompt les deux communications *simultanément* après un temps très court, il pourra se faire que l'électricité n'ait pas le temps d'arriver jusqu'au réomètre, et celui-ci ne bougera pas. Si l'on augmente un peu la durée des communications, une partie de l'électricité pourra parvenir à l'instrument, dont l'aiguille sera alors un peu déviée. Il suffira donc, pour obtenir le temps que met l'électricité à parcourir le fil télégraphique, de rendre de plus en plus petit le temps pendant lequel les communications restent établies simultanément, et de saisir le temps pour lequel le réomètre cesse d'être dévié. Mais comme, en approchant de cette limite, l'instrument n'est parcouru que par une très petite quantité de fluide, ce qui la rend difficile à obtenir d'une manière précise, il faut faire en sorte de faire passer cette même quantité de fluide plusieurs fois de suite, en répétant l'expérience à des intervalles très courts, pour que l'aiguille reçoive plusieurs impulsions égales. Il faut aussi évidemment, que le fil soit déchargé chaque fois avant d'être rechargé.

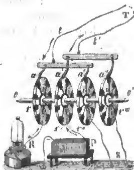


Fig. 1180.

On peut se faire une idée de l'appareil que MM. Guillemin et Burnouf ont imaginé pour remplir ces diverses conditions, au moyen du croquis ci-contre (*fig.* 1180). Quatre roues en bois *r*, *r'*, *r''*, *r'''*, de 5 centimètres de diamètre, sont fixées à un même arbre *oo'*. Ces roues portent, incrustées sur leur contour, des lames de laiton équidistantes unies métalliquement à un anneau de laiton i, i, i, i, sur lequel s'appuie constamment un ressort. Les ressorts des roues *r*, *r'* qui sont destinées à charger le fil, communiquent, l'un avec le pôle de la pile P, l'autre avec le fil du réomètre R. L'extrémité *t* du fil télégraphique T communique avec des ressorts *a*, *a''* qui frottent sur le contour des

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XXXIX, p. 330.

roues r, r''; et l'extrémité t', avec les ressorts a', a''' qui s'appuient sur le contour des roues r', r'''. Les anneaux i, i des roues r'', r''' communiquent en S avec le sol. Quand les roues tournent, les communications du fil T avec la pile et avec le réomètre, sont établies, par l'intermédiaire de la virole de laiton, au moment où les ressorts a, a' s'appuient sur des lames métalliques ; et cessent quand ces ressorts s'appuient sur du bois. Les deux roues r'', r''' sont affermies sur l'arbre oo', de manière que les ressorts a'', a''' touchent du métal quand les ressorts a, a' s'appuient sur du bois, et *vice-versâ ;* de sorte que les ressorts a, a'' servent à décharger le fil T par ses deux extrémités, pendant que les communications sont interrompues en a et a', et laissent ce fil isolé pendant qu'elles sont rétablies.

Les expériences de MM. Guillemin et Burnouf ont été faites sur un circuit de 164 kilomètres. La déviation du réomètre, d'abord très grande quand les roues ne faisaient que 3 ou 4 tours par seconde, diminuait graduellement, jusqu'à 21 tours, quelle que fût la force de la pile. A 21 tours avait lieu le minimum de déviation, mais l'aiguille ne restait jamais au zéro ; cela tenait à une *induction* des deux parties parallèles du fil l'une sur l'autre, comme des expériences directes l'ont prouvé. On a donc pris ce minimum pour le zéro. Le temps pendant lequel les communications restaient établies lors de ce minimum, représentait le temps que mettait l'électricité à parcourir le circuit.

M. Gould a aussi mesuré la vitesse de l'électricité, sur la ligne télégraphique de 1672 kil. entre Washington et Saint-Louis. Il employait un système de télégraphe écrivant analogue à ceux que nous décrirons plus tard. Voici le tableau des résultats trouvés par divers observateurs :

OBSERVATEURS.	Vitesse dans les fils de fer, en kilomètres.	Vitesse dans les fils de cuivre, en kilomètres.
Wheatstone	»	460 000
Fizeau et Gounelle	100 000	180 000
Guillemin et Burnouf	»	180 000
O'Mitchell	45 600	»
Walker	30 000	»
Gould	25 600	»
Entre Greenwich et Edimbourg	»	12 200
Entre Greenwich et Bruxelles	»	4 300

On est frappé des différences énormes qui existent entre les résultats relatifs à un même métal. Nous allons voir comment M. Faraday est parvenu à les expliquer, en tenant compte de la transformation d'une partie de l'électricité dynamique lancée dans le fil conducteur, en électricité statique.

III. De l'association des états dynamique et statique de l'électricité.

1603. L'électricité qui se propage sous forme de courant peut être accumulée sur des conducteurs, et les charger en prenant l'état statique. Volta avait chargé une bouteille de Leydo au moyen d'une pile isolée dont les pôles communiquaient avec les armatures. Pour charger un simplo conducteur, il suffit de le faire communiquer avec l'un des pôles pendant que l'autre pôle communique avec le sol. Ordinairement, le condensateur ou le conducteur isolé que l'on charge avec une pile, acquièrent instantanément le maximum de charge ; mais cela tient à leurs faibles dimensions comparées à la grande vitesse de propagation de l'électricité. Quand ces conducteurs présentent une trés grande surface, l'écoulement de l'électricité de la pile dure pendant un temps appréciable, et forme un courant qui peut être accusé par l'aiguille aimantée. M. Faraday et M. Wheatstone ont fait, à ce sujet, au moyen des fils des télégraphes électriques, des expériences qui ont jeté un nouveau jour sur le mode de propagation de l'électritité [1].

1604. Introduction de l'électricité dynamique dans un vaste conducteur. — Les expériences de M. Wheastone ont été faites avec un câble destiné à établir une communication télégraphique sous-marine entre le Piémont et la Corse. Ce câble, de 177 kilométres de longueur, contenait 6 fils de cuivre isolés les uns des autres par une enveloppe en gutta-percha, et l'ensemble était entouré d'une armature de 12 fils de fer épais contournés en hélice. Ce câble était enroulé dans un puits sans eau, et l'on pouvait réunir les fils de cuivre deux à deux, à ses extrémités, de manière à former un seul fil de 1062 kilométres. L'un des pôles d'une pile de 144 couples à la Wollaston ayant été mis en communication avec le sol, et l'autre, avec l'un des bouts du fil de cuivre dont l'extrémité opposée était isolée, un réométre interposé prés de la pile indiqua un courant, qui cessa bientôt, quand tout le fil eut été chargé d'électricité. Cependant avec un réomètre très sensible, on observait un faible courant permanent, dû à la déperdition de l'électricité par les différents points du long conducteur. En effet, l'intensité de ce faible courant était en raison inverse de la distance de la pile au point où on l'observait, et, près de la pile, elle était sensiblement proportionnelle à la longueur totale du fil. Cette intensité était aussi à peu prés proportionnelle au nombre des couples, tant que la déviation ne dépassait pas 36°. — Le courant se manifestait encore dans deux des fils de 177 kilomètres séparés l'un de l'autre et isolés à l'extrémité opposée à la pile, quand chacun d'eux était en communication avec un des pôles ; et deux réométres placés près des pôles, indiquaient des courants de sens contraire l'un à l'autre. Dans les deux expériences qui précèdent, on n'observe

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XLI, 123, et XLVI, 121.

aucune déviation de l'aiguille aimantée quand un des pôles de la pile est isolé. — Le fil de 1062 kilomètres ayant été mis en communication avec le sol par l'une de ses extrémités, puis avec la pile, par l'autre, on vit trois réomètres placés l'un au milieu, et les deux autres près des extrémités du long fil, se dévier successivement, en commençant par le plus rapproché de la pile ; ce qui montre la propagation successive de l'électricité. — Le long fil étant isolé et chargé comme dans la première expérience, l'extrémité isolée fut mise en contact avec le sol ; les réomètres furent encore déviés successivement, mais en commençant par le plus éloigné de la pile. — L'un des bouts du fil de 1062 kilomètres ayant été mis en communication avec l'un des pôles de la pile, et l'autre bout ayant été joint ensuite au second pôle, les réomètres extrêmes furent aussitôt déviés ; mais celui du milieu ne se mit en mouvement qne quelques instants après. Enfin, le fil étant séparé au milieu, et ses extrémités, réunies aux pôles de la pile, on rétablit la jonction au milieu ; le réomètre placé en ce point s'agita immédiatement, et ceux qui étaient près des pôles, seulement quelques instants après. Tous ces phénomènes s'expliquent facilement dans la théorie de la propagation progressive de l'électricité par des décharges intermoléculaires.

1605. Condensation de l'électricité dans des fils isolés et submergés. — On doit à M. Faraday des expériences remarquables qui prouvent qu'un fil métallique enveloppé de gutta-percha et plongé dans un milieu conducteur, se comporte comme un condensateur électrique dont l'enveloppe de gutta-percha formerait la lame isolante, et le liquide, l'armature extérieure [1]. Dans ces expériences, cet éminent physicien s'est servi d'un câble formé d'un fil de cuivre recouvert de gutta-percha et divisé en parties de 800 mètres de longueur, enroulées en paquet et suspendues à des barques sur un canal. 200 paquets semblables plongeaient dans l'eau, et leurs extrémités étaient réunies deux à deux hors de l'eau, de manière à former une longueur totale de 160 kilomètres. Ce câble étant isolé à une extrémité, on le chargea d'électricité au moyen d'une pile de 360 couples. Un observateur toucha ensuite le fil d'une main, pendant que son autre main communiquait avec le sol, et il reçut aussitôt une violente commotion ayant une certaine durée, comme celle d'une batterie voltaïque. Il pouvait, par plusieurs contacts rapides, diviser la décharge en plusieurs temps. On pouvait aussi, au moyen du réomètre, constater l'existence d'un courant pendant que le fil se chargeait et pendant qu'on le déchargeait, et saisir la propagation successive de l'électricité, au moyen de plusieurs réomètres placés aux extrémités et au milieu du fil. Il s'écoulait quelquefois 2 secondes entre les instants où les instruments extrêmes se mettaient en mouvement. Des résultats semblables ont été obtenus avec des fils revêtus de gutta-percha et enfouis dans la terre. Quand ces fils étaient suspendus dans l'air, on n'obtenait plus la commotion ; phénomène qui se montrait de nouveau quand l'enveloppe isolante du fil était recouverte d'une

[1] *Bibliothèque universelle de Genève* (Archives des sciences), t. XXV, p. 209.

gaîne en plomb ou de fils métalliques en hélice, ou même quand le câble était suspendu à une petite distance de corps conducteurs, comme la surface du sol, des murs..., qui formaient alors l'armature extérieure d'un condensateur dont la gutta-percha et l'air interposé formaient la couche isolante. Dans ce dernier cas, les effets étaient d'autant moins prononcés que la distance du fil aux corps conducteurs était plus grande. Ajoutons que ces divers effets avaient déjà été observés par M. Siemens.

1606. Application à la mesure de la vitesse de l'électricité. — M. Faraday est parti des faits qui précédent pour expliquer les différences entre les nombres trouvés pour la vitesse de l'électricité. Disons d'abord que la valeur la plus faible a été obtenue avec un fil sous-marin. Dans ce cas, l'électricité qui entre dans le fil commence par être dissimulée, et il n'en passe au-delà d'un point donné, qu'après la charge du condensateur formé par l'eau et par la partie du câble qui précède ce point. Il n'arrive donc du fluide dans la partie extrême de ce câble qu'après qu'il s'en est accumulé dans son intérieur une énorme quantité à l'état latent. Il se passe ici quelque chose d'analogue à ce qui a lieu dans un tuyau de conduite présentant de nombreux renflements, que l'eau doit d'abord remplir avant de parvenir à l'extrémité. Quand le fil n'est pas enfoui ou submergé, la proximité du sol, ou des murs auxquels il peut être fixé en certains endroits, comme sous les tunnels, le long des viaducs, dans les tranchées, est une cause de retard dans l'instant de l'arrivée du mouvement électrique à un point éloigné.

M. Clarke a fait des expériences qui montrent bien les effets de la condensation de l'électricité dans les fils enfouis. A l'extrémité opposée à la pile était interposé un appareil analogue au télégraphe électro-chimique de M. Bain, dans lequel un style s'appuie sur un cylindre tournant, et laisse derrière lui une ligne bleue quand on le fait communiquer avec le pôle d'une pile. Trois fils isolés communiquaient avec trois styles appuyés sur une même arête du cylindre. Un de ces fils était très court; des deux autres qui étaient égaux et très longs, l'un était enfoui et l'autre suspendu dans l'air. Si l'on faisait communiquer, *au même moment*, le pôle de la pile avec le fil court et le fil enfoui, on remarquait que la ligne bleue tracée par le style du fil enfoui, commençait un peu après celle que formait le style du fil court. De plus, le trait en retard était d'abord très faible et augmentait graduellement d'épaisseur. Quand on supprimait le courant, le trait correspondant au fil court s'interrompait aussitôt, tandis que celui du fil enfoui se prolongeait encore un peu et ne cessait que graduellement, en diminuant peu à peu d'épaisseur. Le long fil suspendu dans l'air donnait les mêmes résultats que le fil court. Si l'on supprimait et rétablissait les communications à des instants très rapprochés, les styles des fils aériens marquaient des lignes bleues interrompues, et le fil enfoui, une ligne continue. Si les intermittences se succédaient moins rapidement, cette dernière ligne présentait des renflements alternatifs, qui se trouvaient séparés par des interruptions, quand les intermittences étaient encore moins rapides.

On voit, d'après ce qui précède, que les résultats des recherches faites sur la vitesse de l'électricité sont très incertains. En supposant même qu'on ait soin d'éviter les effets de condensation dont nous venons de parler, l'accumulation graduelle du fluide dans le condensateur (1604) montre que les expérimentateurs ne font, en définitive, que saisir le moment où le fluide est capable de donner des signes de son passage. Or, cet instant dépend évidemment de la sensibilité des appareils employés. Ces expériences auraient donc besoin d'être reprises; tout ce qu'on peut conclure de celles qui ont été faites, c'est que la vitesse de l'électricité dans les bons conducteurs est extrêmement grande.

§ 2. — LOIS DES INTENSITÉS DES COURANTS ÉLECTRIQUES.

1. Mesure des intensités des courants.

1607. Des différentes méthodes réométriques. — On a d'abord évalué l'intensité des courants au moyen du voltamètre. Mais cette méthode ne peut s'appliquer qu'aux courants qui restent constants pendant un temps assez long, et qui sont assez intenses pour produire des décompositions rapides. On s'est aussi servi de l'échauffement par le courant d'un fil placé dans des conditions données (1526). Aussitôt après la découverte d'Œrsted, on a fait servir l'aiguille aimantée à la mesure de l'intensité des courants. MM. Biot et Savart ont employé d'abord la méthode des oscillations : on fait osciller une aiguille astatique à une distance constante d'un fil métallique, et les intensités des courants qui le traversent successivement sont entre elles comme les carrés des nombres d'oscillations faites dans le même temps. M. Ohm a employé le premier la méthode de torsion : l'aiguille étant suspendue parallèlement au réophore, par un fil métallique très fin fixé à un micromètre semblable à celui de la balance magnétique (1213), on l'amène, dans chaque expérience, à faire le même angle avec le courant, en tournant le micromètre, pour tordre convenablement le fil. Mais c'est surtout au moyen des réomètres multiplicateurs, que l'on compare les courants.

1608. Des réomètres. — Nous avons fait connaître le principe du multiplicateur à une et à deux aiguilles, et indiqué comment il peut servir à constater l'existence des plus faibles courants (1440). Quand on veut que l'instrument serve à comparer les intensités de ces courants, on dispose un cercle gradué au-dessous de l'aiguille supérieure. Ce cercle gradué est formé ordinairement d'une lame de cuivre, une semblable lame ayant la propriété, comme nous le verrons, d'amortir les oscillations de l'aiguille. Le multiplicateur ainsi muni d'un cadran, a reçu de M. Péclet le nom de *réomètre*, nom préférable à celui de *galvanomètre*, sous lequel il est souvent désigné. Pour comparer les intensités des courants au moyen de cet instrument, on observe l'angle que fait

l'aiguille aimantée avec le plan du cadre, qu'on a toujours soin de placer dans le *méridien magnétique*. La *fig.* 1181 représente le réomètre sous la forme qu'on lui donne ordinairement. *ab* est le cadre en bois sur lequel est enroulé le fil recouvert de soie, dont *n*, *n'* sont les extrémités. *l* est l'aiguille supérieure, suspendue par un fil de soie sans torsion *f*; elle est liée invariablement à une autre aiguille parallèle, placée dans l'intérieur du cadre et dont les pôles sont opposés aux siens, par une tige en cuivre qui passe dans un petit tube de verre traversant la partie supérieure du cadre. Au moyen d'une vis que l'on voit au haut de l'appareil, on peut faire descendre le fil de suspension, de manière que l'aiguille *l* repose sur le cadran divisé, quand on ne se sert pas de l'instrument.

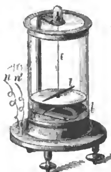


Fig. 1181.

Le faisceau que forme le fil enroulé autour du cadre de bois, ayant une certaine largeur, il faut avoir soin qu'il soit distribué bien régulièrement, de manière qu'il ne forme pas une plus grande épaisseur d'un côté que de l'autre. On vérifie si cette condition est bien remplie, en faisant passer un même courant successivement en sens opposé, et voyant si l'aiguille se dévie de la même quantité de part et d'autre du méridien magnétique, auquel le plan du cadre doit toujours être parallèle. Quand l'instrument est destiné à constater le passage de l'électricité à forte tension, comme celle des machines électriques, on isole les tours du fil avec beaucoup de soin; on sépare alors les différentes couches qu'il forme, par des lames de taffetas gommé, ou même on enduit de gomme laque le fil recouvert de soie, à mesure qu'on l'enroule.

M. Bonelli construit des réomètres très sensibles et très économiques sans fils métalliques, en enroulant sur le cadre une bande de papier sans fin, sur laquelle sont tracées des lignes dorées que parcourt le courant, et qui sont isolées par le papier.

Réomètre de Péclet. — Péclet a imaginé un appareil dans lequel il a fait disparaître plusieurs imperfections du réomètre ordinaire. Dans ce dernier, le fil qui enveloppe le cadre est divisé en deux faisceaux à sa partie supérieure, pour laisser passer la tige qui réunit les deux aiguilles; et comme le fil de cuivre est souvent un peu magnétique, il en résulte que l'aiguille peut prendre quelquefois trois positions d'équilibre différentes; ce qui induit en erreur quand on opère sur de faibles courants [1]. De plus, les aiguilles étant très minces, leur état magnétique est facilement modifié par le courant. Dans le réomètre de Peclet (*fig.* 1182), les deux aiguilles ont 4 millimètres d'épaisseur, et sont réunies par un rectangle en ivoire *nn*, perpendiculaire à leur direction; ce qui

[1] Quelques constructeurs se mettent à l'abri de cette cause d'erreur, en fabriquant le fil de l'instrument au moyen de cuivre très pur, obtenu par précipitation électro-chimique.

dispense de diviser le fil en deux faisceaux. Une troisième aiguille, qui peut tourner autour du centre d'un cercle *a*, dans le plan vertical qui contient les deux autres, permet de modifier à volonté la force directrice du système. Le cadran divisé est formé d'un disque épais en cuivre. Les extrémités du fil de l'instrument sont soudées à deux disques en laiton *c*, *c'* isolés l'un de l'autre et munis de plusieurs trous dans lesquels on peut enfoncer les fils réophores *f*, *f'*. Enfin, on peut faire tourner le cadre autour d'un axe vertical, pour l'orienter, au moyen d'une tige centrale qui sort en dessous, et est terminée par un bouton, caché dans la figure, par le disque *c'*.

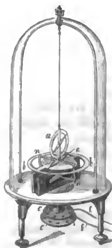


Fig. 1182.

1609. De la sensibilité du réomètre. — La sensibilité d'un réomètre dépend de la force individuelle de chacune des deux aiguilles aimantées, force qui doit être aussi grande que possible; de la force directrice du système, qui doit être au contraire très faible, et du nombre de tours que fait le fil sur le cadre. Il ne faut pas croire cependant que la sensibilité augmente toujours avec le nombre des tours ; cela dépend de la tension de la source qui fournit l'électricité. Quand cette tension est très faible, comme dans les piles thermo-électriques, il y a désavantage à multiplier le nombre de tours ; car, alors, la résistance à la propagation de l'électricité dans le réomètre devenant plus grande que celle de l'électromoteur, la majeure partie de l'électricité se recombinerait dans l'intérieur de la pile. Quand on a un réomètre très sensible, il faut éviter d'y introduire des courants trop forts, car on pourrait changer l'état magnétique des aiguilles, ou même, si le courant était introduit brusquement, détruire l'aimantation de l'une d'elles, déplacer son axe magnétique, ou enfin renverser ses pôles. D'un autre côté, les aiguilles s'approchant beaucoup de la position perpendiculaire au méridien magnétique, l'instrument ne donnerait que des indications incertaines, et de grandes variations dans l'intensité deviendraient insensibles. Il faut donc avoir plusieurs instruments appropriés aux différents courants que l'on veut étudier. Quelquefois le même cadre reçoit plusieurs fils indépendants les uns des autres, faisant des nombres de tours différents, et l'on fait passer le courant dans le fil que l'on veut. On peut aussi réunir ces fils bout à bout de manière à n'en former qu'un seul.

MM. Fabre et Kunemann ont imaginé un réomètre (*fig.* 1123) dont on peut faire varier la sensibilité entre certaines limites. *e* est l'aiguille aimantée, et *ca* le cadre autour duquel est enroulé le fil. Les extrémités de ce fil sont terminées par des ressorts qui s'appuient sur des règles métalliques isolées *rr'*, *rr'*, aux extrémités *r'*, *r'* desquelles on adapte les fils qui apportent l'électricité ; le courant passe alors d'une règle à l'autre à travers le fil du cadre *ac*. Ce cadre

porte en dessous un écrou traversé par une vis fixe *v*. Si l'on fait tourner cette vis, le cadre se rapproche plus ou moins de l'aiguille. Quand le cadre est placé de manière à entourer l'aiguille, on a un réomètre ordinaire. Quand ensuite on éloigne le cadre, l'action du courant sur l'aiguille va en diminuant, et l'appareil constitue un réomètre moins sensible. L'intensité d'action d'un même courant paraît varier en raison inverse du carré de la distance.



Fig. 1183.

Nous avons décrit plus haut le réomètre différentiel (1441). M. Wheatstone a imaginé de faire servir les réomètres ordinaires, de réomètres différentiels, en faisant passer dans le fil unique, les deux courants en sens contraire.

1610. Tables de graduation. — Les intensités des courants qui traversent un même réomètre ne sont pas proportionnelles aux déviations, car la composante efficace de l'action magnétique terrestre augmente avec la déviation, et la composante du courant qui lui fait équilibre est d'autant plus faible que les aiguilles se rapprochent davantage de la position perpendiculaire au plan du cadre. C'est, en effet, suivant cette direction que le courant agit; car c'est celle que prend une aiguille *astatique*. Cependant, on peut regarder les déviations comme proportionnelles aux intensités des courants, quand l'angle ne dépasse pas 20°. Pour les déviations plus considérables, il faut construire des *tables*, dans lesquelles on consigne les intensités, déterminées par l'expérience, correspondantes aux différentes déviations. Plusieurs physiciens se sont occupés de la construction de ces tables. Nous avons fait connaître la méthode qu'employait Melloni en se servant des courants thermo-électriques (II,712). M. Becquerel a employé le moyen suivant : on enroule autour d'un cadre de multiplicateur, un faisceau de 4 fils égaux, en cuivre, enveloppés de soie. Chaque fil est en communication par ses deux extrémités, avec un couple fer et cuivre. On fait passer un courant thermo-électrique successivement dans 1, 2, 3 ou 4 fils, en plongeant une des deux soudures de chaque fil dans du mercure chaud, l'autre étant à 0°, et l'on compare les déviations aux actions exercées sur l'aiguille aimantée; actions qui sont évidemment entre elles comme les nombres 1, 2, 3, 4. On fait de même pour différentes températures du mercure, et l'on obtient ainsi les éléments d'une table.

Peltier et M. Poggendorff [1] ont aussi donné des méthodes pour construire des tables de graduation. Chaque instrument en exige une faite exprès pour lui, et même cette table ne peut plus servir dès que le magnétisme des aiguilles a été modifié, soit par le passage des courants, soit par d'autres causes accidentelles. Heureusement, il existe des instruments et des méthodes au moyen desquels on peut obtenir directement l'intensité des courants; c'est pourquoi nous

[1] *Ann. de ch. et de ph.*, 2e série, t. LXXI, p. 225, et 3e série, t. VIII, p. 115.

n'insisterons pas davantage sur la construction des tables, et nous passerons immédiatement à la description des instruments qui donnent directement les intensités, instruments qui pourraient servir au besoin à construire les tables pour les réomètres ordinaires.

1611. Réomètres comparables. — Citons d'abord le *réomètre de torsion* ou de *Ritchie*. Cet instrument présente la forme d'un réomètre ordinaire. Les aiguilles sont suspendues à un fil métallique fixé par sa partie supérieure à un micromètre, au moyen duquel on peut tordre le fil, de manière à ramener constamment les aiguilles dans le plan du cadre, qui doit toujours se trouver dans le méridien magnétique. L'angle de torsion du fil est alors proportionnel à la force du courant.

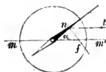


Fig. 1184.

Boussole des sinus. — Le principe de cet instrument a été trouvé par M. de La Rive. Il est évident que si le plan du cadre d'un réomètre conservait toujours la même position par rapport à l'aiguille aimantée, les intensités de deux courants successifs seraient entre elles comme les composantes efficaces de la force magnétique terrestre. Or, la composante efficace *nf* (*fig.* 1184) a pour valeur $t \sin \alpha$, en appelant t la composante horizontale de la force terrestre, et α l'angle que fait l'aiguille avec le méridien magnétique *mm'*. On peut donc dire que les intensités des courants sont alors entre elles comme les *sinus* des déviations. Un réomètre ordinaire peut constituer une *boussole des sinus*, quand on a soin de faire tourner le cadre de manière que le zéro du cadran vienne toujours se placer sous l'aiguille.

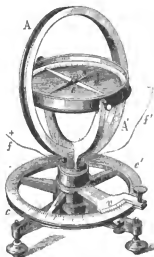


Fig. 1185.

La *fig.* 1185 représente une *boussole de sinus* construite par M. Pouillet. Le fil recouvert de soie, dont on voit les extrémités en *f*, *f'*, fait un ou plusieurs tours sur le cercle AA', au centre duquel se trouve l'aiguille aimantée *e* avec son limbe gradué. Une tige légère en baleine ou en roseau, est fixée perpendiculairement au milieu de l'aiguille, et sert à observer sa position, avec une exactitude d'autant plus grande que cette tige est plus longue. Le cercle AA' peut tourner autour d'un axe vertical, de quantités angulaires données par le vernier *v*, qui parcourt les divisions d'un cercle horizontal *cc'*. Pendant le passage du courant, on fait tourner le plan AA', de manière que l'aiguille corresponde toujours au zéro. Le vernier donne alors

l'angle que fait le plan AA′, et par conséquent l'aiguille *e*, avec le méridien magnétique, angle dont il reste ensuite à prendre le sinus. Au lieu de maintenir l'aiguille au zéro du limbe qu'elle parcourt, on peut l'astreindre à faire un angle constant avec le plan du cercle AA′; de cette manière on peut faire varier la sensibilité de l'instrument. Il est évident qu'il est le plus sensible quand on maintient l'aiguille sur le zéro, car le courant agit alors avec le plus d'efficacité. Remarquons encore que la boussole des sinus n'ayant qu'une seule aiguille, les résultats qu'elle donne ne sont pas modifiés par les changements que peut éprouver son état magnétique; car ces changements affectent également l'action terrestre et l'action du courant sur l'aiguille.



Fig. 1186.

1612. Boussole des tangentes. — La boussole des sinus exige une manipulation qui demande un certain temps; il est des cas où l'on a besoin de connaître promptement la force d'un courant par une simple lecture, par exemple quand ce courant varie continuellement. On emploie alors la *boussole des tangentes*, dont voici le principe : considérons une aiguille aimantée *o* (*fig.* 1186) mobile sur une large bande métallique AB parallèle au méridien magnétique *mn* et traversée par le courant, de manière que la quantité d'électricité qui passe par chaque direction parallèle à *mn* soit la même (1597). Supposons, de plus, que l'aiguille *o* soit très petite, et que le fluide qui passe par les bords de la lame en soit assez éloigné pour n'avoir aucune influence sur elle, quelle que soit sa position. Alors l'action du courant sur cette aiguille restera la même, de quelque manière qu'elle se tourne. Or, cette action *c* étant perpendiculaire à *mn*, sa composante perpendiculaire à l'aiguille est $f' = c \cos \alpha$. Cette composante fait équilibre à la composante efficace $f = t \sin \alpha$ de l'action terrestre ; on a donc :

$$c \cos \alpha = t \sin \alpha, \text{ d'où } c = t \operatorname{tang} \alpha.$$

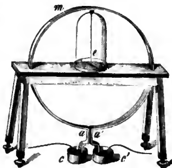


Fig 1187.

L'intensité du courant est donc proportionnelle à la tangente de l'angle de déviation. Peclet a proposé de construire une boussole des tangentes sous cette forme même; l'aiguille serait alors renfermée dans une boîte placée sur la bande métallique, et munie d'un cercle gradué.

On peut faire en sorte que l'action du courant sur l'aiguille reste sensiblement constante dans toutes les positions de cette dernière, en la plaçant au centre d'un circuit circulaire de grand diamètre. C'est ainsi que M. Pouillet a

construit la boussole des tangentes représentée dans la *fig.* 1187. *ama'* est une bande circulaire de cuivre dont les extrémités très rapprochées *a*, *a'*, plongent dans des vases pleins de mercure *c*, *c'*, dans lesquels on enfonce aussi les fils qui apportent le courant. L'aiguille aimantée *e*, suspendue au centre, doit être très petite : on y adapte des appendices en cuivre suivant le prolongement de son axe, ou bien on y fixe perpendiculairement une longue tige de roseau, pour faciliter la mesure des angles de déviation. On prend ensuite les tangentes de ces angles, auxquels les intensités des courants sont proportionnelles.

Limite d'exactitude de la boussole des tangentes. — L'aiguille aimantée n'étant pas infiniment petite, on ne peut dire que ses pôles restent constamment à la même distance de tous les points du circuit *ama'*. Aussi, beaucoup d'observateurs, parmi lesquels MM. Poggendorff, Weber, Lenz, Despretz, Bravais, Gaugain....., ont-ils cherché, soit par l'expérience, soit par le calcul, jusqu'à quel point on peut avoir confiance dans la méthode des tangentes. M. Despretz a étudié cette question par l'expérience [1]. Il faisait passer un courant constant à travers la bande circulaire de cuivre, puis il affaiblissait ce courant dans un rapport connu, au moyen d'une dérivation convenable, et comparait le rapport des tangentes des déviations, au rapport connu des intensités des courants. Il a reconnu ainsi que, pour que la méthode des tangentes soit suffisamment exacte, il faut que le diamètre du circuit soit de 1 mètre quand l'aiguille a trois centimètres de longueur. Mais alors l'appareil est peu sensible, à moins qu'on ne remplace le ruban métallique par un fil de cuivre faisant plusieurs tours. M. Blanchet et M. de la Provostaye, en partant des lois de l'électromagnétisme, que nous ferons connaître plus tard, ont trouvé, par le calcul, que l'intensité c d'un courant qui produit la déviation α en passant dans le cercle de l'appareil, est donnée par la formule

$$c = t\,(1 + 3d^2)\tan\alpha - \frac{15\,d^2}{8}\sin 2\alpha,$$

dans laquelle d est le rapport entre la distance des pôles de l'aiguille aimantée et le diamètre du circuit. Quand on suppose d infiniment petit, la formule se réduit à $c = t \tan\alpha$. M. Despretz a trouvé que les résultats donnés par cette formule générale sont d'accord avec l'expérience ; les différences correspondent à peine à quelques minutes de degré. Mais il est évident que cette formule ne peut être d'un usage pratique, d'autant plus que la détermination de la distance des pôles d'une aiguille très courte laisse toujours beaucoup d'incertitude.

Les erreurs que donne la boussole des tangentes tiennent en grande partie à ce que les pôles de l'aiguille s'éloignent sensiblement du plan du cercle, quand la déviation augmente. M. Gaugain a pensé qu'en plaçant le centre de l'aiguille à une distance convenable de ce plan, de manière que l'un de ses pôles s'en rapproche pendant que l'autre s'en éloigne, il pourrait éviter cette cause d'erreur.

[1] *Comptes rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XXXV, p. 450.

L'expérience a confirmé cette prévision. La *fig.* 1188 représente l'appareil avec lequel M. Gaugain a expérimenté. Le cercle réophore *ab* et l'aiguille *e* sont soutenus par des supports séparés *d* et *n*, dont le dernier *d* peut glisser dans une coulisse *cc'*, de manière que le plan du cercle peut être placé à différentes distances de l'aiguille. Des expériences faites avec deux cercles de diamètre différent, ont montré que les tangentes des déviations sont proportionnelles aux intensités des courants, quand la distance entre le centre de l'aiguille et le centre du cercle, est le quart du diamètre de ce dernier. Pour qu'on pût faire varier l'intensité du courant dans un rapport connu, le cercle était entouré par un faisceau de quatre fils identiques régulièrement tordus ensemble, qu'on réunissait de manière à faire passer le courant dans un circuit de longueur double, triple ou quadruple, à volonté, et à doubler ainsi, tripler ou quadrupler son action, que l'on comparait ensuite aux tangentes des déviations. Pour éviter l'influence des variations d'intensité de la pile de Daniell dont il se servait, M. Gaugain alternait les observations faites avec les circuits qu'il comparait. Il avait soin aussi, au moyen de fils additionnels introduits dans le circuit en dehors du cercle, de faire en sorte que la résistance totale fût toujours la même.

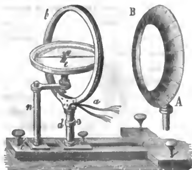


Fig. 1188.

La loi trouvée par M. Gaugain n'ayant été obtenue qu'avec deux cercles différents, il était important de s'assurer si elle peut être généralisée. C'est ce qu'a fait M. Bravais, en soumettant la question au calcul. — Il résulte aussi de cette loi, que les circuits circulaires de différents diamètres qui produisent des déviations dont les tangentes varient comme les intensités, sont situés sur un cône droit ayant son sommet au centre de l'aiguille, et dont le diamètre de base est quadruple de la hauteur. M. Gaugain est parti de là pour construire une boussole des tangentes à multiplicateur ; il enroule sur une portion de cône AB (*fig.* 1188) ayant les proportions ci-dessus, et qu'il substitue au cercle *ab*, un fil de cuivre faisant beaucoup de tours, et il éloigne ce cône de manière que son sommet soit en *e*.

1613. Magnétomètre électrique de Weber. — Cet appareil très précis peut servir à comparer les intensités des courants par la méthode des tangentes, quand on n'opère que sur de très petites déviations. Un ou plusieurs fils recouverts de soie, *c* (*fig.* 1189) sont enroulés sur un cylindre elliptique horizontal, en cuivre épais, qui amortit les oscillations. Ces fils aboutissent à des boutons fixés sur une plaque d'ivoire *a*. Dans le cylindre, est suspendu, par un faisceau de fils de soie sans torsion, un barreau aimanté *n*, représenté à part en N.

Ce barreau est accroché au-dessous d'un cadre *o*, O, qui embrasse, sans le toucher, le haut du cylindre elliptique. Un miroir plan *m*, M, perpendiculaire au barreau *n*, N, en suit les mouvements, et sert à mesurer avec une grande exactitude les petites déviations, par la méthode de M. Gauss (1,435). Un petit arc divisé *r* peut aussi donner approximativement les déviations; il sert principalement à amener l'aimant au zéro, ce qui se fait facilement, l'appareil pouvant tourner autour d'un axe vertical porté par son pied. Le fil de suspension *f* est fixé au petit treuil d'un micromètre *d* semblable à celui de la balance de Coulomb; ce qui permet d'appliquer la méthode de torsion, après avoir suspendu l'aimant à un fil métallique ou à un système *bi-filaire* (1294). L'appareil peut servir de magnétomètre pour étudier le magnétisme terrestre; alors les fils réophores sont inutiles.

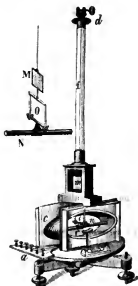


Fig. 1189.

1614. Balance électro-magnétique. — Cet instrument, imaginé par M. Becquerel, fait connaître les intensités des courants, au moyen de poids. Aux bassins *b*, *b'* d'une balance sensible au milligramme (*fig.* 1190) sont suspendus des barreaux aimantés *a*, *a'* qui entrent sans frottement dans des tubes de verre verticaux *t*, *t'* entourés d'un fil de cuivre recouvert de soie faisant plusieurs milliers de tours. Ces tubes peuvent être centrés par rapport aux axes des aimants au moyen de vis de rappel, *v*, *v'*. Si l'on fait passer un courant en sens opposé autour des tubes *t*, *t'*, l'aimant est soulevé dans l'un d'eux et s'enfonce dans l'autre, et il faut, pour rétablir l'équilibre, mettre sur l'un des plateaux *b*, *b'* des poids, qui représentent l'intensité du courant. Par exemple, un courant produit par un couple zinc et cuivre de 4 centimètres carrés plongé dans l'eau distillée, n'ayant exigé qu'un poids de 2,5 milligrammes pour que l'équilibre fût rétabli, il a fallu employer un poids de 35^{mg}, après qu'on eût ajouté une goutte d'acide sulfurique à l'eau. Le second courant était donc égal à 14 fois le premier.

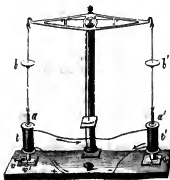


Fig. 1190.

Nous avons vu que la force magnétique d'un courant est proportionnelle à sa

force chimique (1563). M. Marié-Davy est parti de là pour rendre les divers réomètres comparables *entre eux :* il observe la déviation que leur fait subir un courant, dont l'intensité constante est mesurée par le volume de gaz dégagé dans un voltamètre pendant l'unité de temps. Par exemple, si nous considérons une *boussole des tangentes*, l'intensité I du courant sera $I=k$ tang d, k étant une constante qu'il faut évaluer pour chaque instrument. Or, on prend pour unité d'électricité l'équivalent d'électricité, c'est-à-dire la quantité qui décompose 1 équivalent d'eau (1566). L'intensité du courant sera donc représentée par le nombre d'équivalents d'eau qu'il décompose en une minute. Soit I' ce nombre et d la déviation de la boussole des tangentes ; on aura $I'=k$ tang d, d'où l'on tirera la valeur de k, et alors la formule donnera pour chaque déviation, l'intensité ou équivalent d'électricité par minute. On fera de même pour la boussole des sinus, en partant de la formule $I=k$ sin d.

II. Lois des intensités des courants. — Lois de Ohm et Pouillet.

1615. Lois de la résistance des fils d'après leurs dimensions. — *La résistance qu'un fil métallique introduit dans un circuit oppose au passage de l'électricité, est en raison directe de sa longueur et en raison inverse de sa section.* Ces lois peuvent aussi s'énoncer de la manière suivante : *la conductibilité d'un fil métallique est en raison inverse de sa longueur et en raison directe de sa section.* On dit encore que, la longueur étant constante, la conductibilité est proportionnelle à la masse du fil, parce que sa masse est en raison directe de sa section. Ces lois ont été énoncées pour la première fois par H. Davy. Pour les démontrer, il détournait d'un voltamètre, au moyen du fil à étudier, toute l'électricité fournie par une pile, admettant que ce résultat était obtenu quand il ne voyait plus de dégagement de gaz, et il trouva que deux fils de même substance et de même section devaient avoir, pour détourner ainsi toute l'électricité, des longueurs proportionnelles au nombre des couples de la pile. Il prouva ensuite que deux fils de même substance détournent également toute l'électricité d'une même pile, quand leur longueur est proportionnelle à leur section ; d'où il conclut la loi relative aux sections. Ces expériences étaient loin d'être convainquantes, la méthode étant peu précise, surtout dans un temps où l'on ne connaissait pas les piles à courant constant, et où la proportionnalité de l'intensité du courant au nombre des couples n'était pas encore démontrée.

M. Becquerel a trouvé ces mêmes lois par une méthode indépendante des variations d'intensité de la pile [1]. On fait passer en sens contraire dans un réomètre différentiel R (*fig.* 1191), deux courants égaux provenant d'une

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXXII, p. 420.

même pile P, dont les réophores se bifurquent. Tout étant identique dans les deux circuits, l'aiguille du réomètre reste au zéro. Cela posé, si l'on réunit par des fils métalliques, les coupes de mercure *a*, *a'* et *b*, *b'*, et si ces fils détournent du réomètre les mêmes quantités d'électricité, l'aiguille reste encore au zéro. Or, M. Becquerel ayant réuni *a*, *a'* par un fil quelconque, reconnut qu'il fallait, pour que l'aiguille restât au zéro, réunir *b*, *b'* par deux, trois... fils de même substance et de mêmes dimensions que le fil *aa'*, quand la longueur était double, triple... ; ou par un seul fil de même longueur et de section double, triple..... On peut admettre que l'électricité éprouve deux fois moins de résistance à passer dans deux fils égaux que dans un seul, de sorte que la loi relative aux longueurs se trouve démontrée directement. La loi des sections découle aussi de ces expériences; du reste, elle est une conséquence directe du mode de propagation de l'électricité, qui passe, comme nous l'avons vu, également par tous les points de la section (1597).

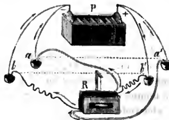


Fig. 1191.

MÉTHODE DE M. POUILLET. — Pour démontrer directement les deux lois, M. Pouillet fait passer dans les deux fils qu'il compare, les courants de deux couples thermo-électriques identiques. Ces couples, représentés (*fig.* 1192), sont formés de deux barreaux de bismuth *ac*, *a'c'* coulés dans un même moule, auxquels sont soudés des fils de cuivre de même longueur. Les extrémités *a*, *a'*, et les extrémités *c*, *c'* étant plongées dans le même bain, on s'assure d'abord que les deux courants sont égaux, en les faisant passer en sens inverse dans un réomètre différentiel.



Fig 1192.

Cela posé, on complète le circuit de chaque couple avec deux brins du même fil de cuivre, dont on enroule une partie sur le cadre d'un même réomètre, de manière que les nombres de tours soient proportionnels aux longueurs totales des fils. Par exemple, si le fil de cuivre du couple *ac* est 4 fois plus long que celui du couple *a' c'*, on fait faire au premier fil 4 tours sur le cadre, et au second 1 tour seulement, les parties enroulées étant recouvertes de soie. Faisant alors passer les deux courants en sens contraire dans les deux fils, on verra l'aiguille du réomètre rester au zéro. Le fil le plus long doit donc agir 4 fois sur l'aiguille pour contrebalancer l'action du plus court, qui n'agit qu'une fois ; le courant qui parcourt ce dernier est donc 4 fois plus intense que l'autre, quoiqu'ils proviennent de sources identiques. — La loi des sections se vérifie de la même manière, en faisant faire à deux fils de même longueur, des nombres de tours sur le cadre, en raison inverse de leur section. Il faut veiller surtout à l'identité de substance des fils, les prendre

dans le même paquet, et, quand on compare les sections, faire tirer à la filière des portions d'un même fil.

La boussole des sinus peut servir à constater les mêmes lois avec une pile constante quelconque : on mesure d'abord l'intensité du courant qu'elle fournit, puis on introduit successivement dans le circuit, des fils de même substance et de dimensions différentes, et l'on mesure la diminution d'intensité que produit l'interposition de ces fils. Cette diminution est en raison directe de la longueur, et en raison inverse de la section des fils.

1616. Cas des colonnes liquides. — Les lois de la résistance des fils métalliques s'appliquent aux colonnes liquides. Pour faire varier la section, M. Fechner faisait passer le courant à travers une auge dans laquelle plongeaient deux lames métalliques servant d'électrodes, et qui contenait un liquide dont il faisait varier la profondeur; la résistance diminuait proportionnellement à la section, pourvu toutefois que la surface des électrodes ne fût pas notablement plus petite que cette section. — Pour étudier l'influence des longueurs, on fait passer le courant à travers une colonne liquide renfermée dans un tube de verre, et dont on fait varier la longueur en écartant plus ou moins les électrodes. Il ne faudrait pas procéder en introduisant la colonne dans le circuit aprés avoir mesuré l'intensité du courant, parce qu'il y a aux électrodes une résistance au passage (1559), qui s'ajouterait à celle qui appartient au liquide. M. Pouillet a aussi fait des expériences sur les lois de la résistance des liquides. Nous décrirons, en étudiant les conductibilités, des appareils avec lesquels se font ces sortes d'expériences.

Les différentes méthodes que nous venons de passer en revue peuvent servir à comparer les conductibilités de fils métalliques de mêmes dimensions et de nature différente. Réciproquement, les méthodes que nous décrirons en parlant de la mesure des conductibilités, ont servi aux physiciens qui les ont imaginées, à vérifier les lois qui viennent de nous occuper.

1617. Conséquences. — Longueur réduite. — Désignons par c, l, s la conductibilité, la longueur et la section d'un fil; par c', l', s' les mêmes quantités pour un second fil; il résulte des lois énoncées, et de ce que la résistance d'un fil est en raison inverse de sa conductibilité, que ces deux fils produiront la même résistance r, ou seront *équivalents*, quand on aura la condition

$$r' = \frac{l}{cs} = \frac{l'}{s'c'}, \qquad \text{ou} \qquad ls'c' = l'sc\,; \qquad \text{d'où} \qquad l = l'\,\frac{sc}{s'c'}.$$

La troisième expression donne la longueur que doit avoir un fil de section s et de conductibilité c, pour produire le même effet qu'un autre fil donné de longueur l', de section s', et de conductibilité c'. La valeur de l se nomme la *longueur réduite* du premier fil, rapportée au second.

Si l'on avait plusieurs fils soudés les uns à la suite des autres dans un circuit, on pourrait demander quelle devrait être la longueur d'un fil unique de section s

et de conductibilité c qui produirait la même résistance. Soient s', c', l'; s'', c'', l''; s''', c''', l'''... les quantités correspondantes aux fils donnés. La longueur l sera égale à la somme des longueurs réduites qui correspondent à chacun des fils ; on aura donc

$$l = l' \frac{sc}{s'c'} + l'' \frac{sc}{s''c''} + l''' \frac{sc}{s'''c'''} + \ldots = sc\left(\frac{l'}{s'c'} + \frac{l''}{s''c''} + \frac{l'''}{s'''c'''} + \ldots\right)$$

1618. LOIS DES INTENSITÉS DES COURANTS. — LOIS DE OHM. — Dans ce qui précède, nous n'avons considéré que la diminution qu'un fil de métal interposé dans un circuit fait éprouver à l'intensité d'un courant donné d'avance ; nous allons maintenant parler des lois relatives aux causes dont dépend cette dernière intensité. Ces causes sont : 1° la force électromotrice qui fournit l'électricité ; 2° les résistances que le fluide peut éprouver à se propager dans le circuit, résistances que M. de La Rive a le premier prises en considération. Les lois, relatives aux intensités des courants calculées d'après leur origine et d'après ces résistances, sont connues sous le nom de *lois de Ohm*. C'est, en effet, M. G.-S. Ohm d'Erlangen qui les a découvertes, en partant de considérations théoriques ; il les a publiées et développées, en 1827, dans son remarquable ouvrage de la *théorie mathématique de la pile galvanique*. Ce travail, présenté d'abord sous une forme trop abstraite, n'a pas été suffisamment remarqué lors de son apparition, et la plupart des physiciens ont hésité à entreprendre la vérification des résultats qu'il contenait. MM. Lenz et Jacobi ont contribué surtout à le répandre ; cependant, il était encore si peu connu en France, que 8 ans plus tard, M. Pouillet entreprenait de belles recherches sur le même sujet, et arrivait par la méthode expérimentale, à la plupart des résultats trouvés par le physicien allemand, dont le mémoire vient d'être savamment traduit par M. Gaugain.

M. Ohm s'est proposé de faire, pour la propagation de l'électricité, ce que Fourier avait fait pour celle de la chaleur. Il part de l'hypothèse de la transmission de l'électricité de molécule à molécule, par des excès de tension infiniment petits ; de même que Fourier considérait la propagation de la chaleur comme se faisant de molécule à molécule par des excès de température. Aussi, cette analogie dans le point de départ apporte-t-elle de grandes ressemblances dans les méthodes analytiques employées par les deux géomètres. M. Ohm est arrivé ainsi à représenter l'intensité I d'un courant, par la formule $I = \frac{E}{R}$, dans laquelle E représente la somme des *forces électromotrices* qui agissent dans le circuit, et R la somme des *résistances* qu'il oppose à la propagation de l'électricité, exprimée numériquement par la longueur réduite de toutes ses parties, y compris la pile ; résistances qui dépendent de la longueur, de la section et de la nature de ces différentes parties. Voici par quelles considérations élémentaires M. Ohm démontre cette formule dans la première partie de son ouvrage.

1619. Formule de Ohm. — Considérons un circuit composé d'un couple P (*fig.* 1193), et d'un fil unique homogène et cylindrique *f*. Développons ce fil suivant une ligne droite AA', et représentons par les ordonnées AB, A'B' les tensions égales et de signe contraire qui existent aux deux pôles de la pile. Ces tensions iront en diminuant à mesure qu'on s'éloignera des extrémités A, A', puisque la propagation se fait par les excès infiniment petits de tension des molécules par rapport aux tensions des molécules suivantes; et au milieu C, où se fait le passage des tensions positives aux tensions négatives, il y aura une section où la tension sera nulle. Il s'établira un état d'équilibre mobile dans lequel il passera à chaque instant la même quantité d'électricité par chaque tranche; ce qui exige que la différence de tension entre deux tranches successives soit constante dans toute la longueur du fil. On démontre, en suivant la même marche que pour la distribution des températures dans un mur (II,804), que cette condition est remplie, quand les tensions de A en C et de A' en C forment une progression arithmétique décroissante, pour des distances aux points A ou A' formant des progressions arithmétiques croissantes; d'où il résulte que les extrémités des ordonnées représentant les tensions, forment une ligne droite BB'. On compare le mouvement de l'électricité dans un fil à celui de la chaleur dans un mur indéfini, et non dans une barre, parce que l'électricité ne se perd pas sensiblement par la surface du fil conjonctif, de même que la chaleur n'éprouve pas de perte latérale dans un mur indéfini.

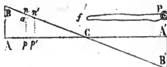


Fig. 1193.

Cela posé, si nous considérons deux ordonnées infiniment voisines *np*, *n'p'*, la différence de tension des tranches qui leur correspondent sera représentée par *na*. Cette différence constante détermine le mouvement de fluide qui constitue l'électricité dynamique. On voit que ce mouvement est partout le même, mais que la tension varie d'un point à l'autre; de même que le flux de chaleur qui traverse un mur solide est constant dans toute son épaisseur, tandis que la température change d'une tranche à l'autre. Quand on suppose $pp' = 1$, la différence *na* se nomme la *chute électrique*. Or, si l'on compare les triangles semblables $n\,a\,n'$, BAC, on a $\frac{an}{an'} = \frac{BA}{AC} = \text{tang}\,\alpha$, en appelant α l'angle BCA; et comme $an' = 1$, la chute *an* est égale à AB : AC. M. Ohm admet que la quantité d'électricité qui passe par une tranche du fil, et par conséquent l'intensité du courant, est proportionnelle à la chute; cette intensité sera donc $I = K\frac{BA}{AC}$, K étant une constante qui dépend de la nature et de la section du fil. Or, AC n'est autre chose que la moitié de la longueur L du fil conjonctif, et BA est la tension aux pôles de la pile, tension que l'on peut prendre pour mesure de la force électromotrice E qui la produit, si l'on suppose, pour le

moment, que l'électricité n'éprouve aucune résistance en traversant les parties solides et les liquides de la pile, pour se rendre des surfaces attaquées où elle prend naissance, à l'un et l'autre pôle. On a donc $I = K\frac{E}{L}$, ce qui montre déjà que l'intensité du courant est proportionnelle à la force électromotrice et en raison inverse de la longueur du fil. Mais toute l'électricité qui correspond à l'intensité AB ou à la force électromotrice E, ne passe pas dans le fil conjonctif, parce que celui-ci présente une certaine résistance. Cette résistance est en raison inverse de la section s et du pouvoir conducteur c du fil (1615); donc, la quantité d'électricité qui passe d'une tranche à la suivante, et par conséquent l'intensité du courant, est proportionnelle à sc. La constante K est donc égale à $K'sc$, et la formule devient $I = K'sc\frac{E}{L}$. Or, $\frac{L}{K'sc}$ représente la résistance R du fil d'après sa section, sa conductibilité et sa longueur; on a donc enfin $I = \frac{E}{R}$, qui est la formule de Ohm, exprimant ce qu'il nomme la *loi fondamentale de la pile voltaïque.*

Cas où le circuit n'est pas homogène. — Supposons maintenant que le fil soit composé de plusieurs parties de longueur, de section et de nature différentes. La même quantité d'électricité devra toujours passer par toutes les tranches, quelle que soit leur position. Mais la chute électrique, partout égale dans un même fil, sera différente d'un fil à l'autre : comme la quantité d'électricité qui passe est en raison inverse de la résistance, il faudra que la chute soit elle-même proportionnelle à cette résistance, pour que la quantité d'électricité qui passe reste constante. Elle devra donc être, comme la résistance, en raison inverse de la conductibilité et de la section. Par exemple, si le fil se compose de trois parties différentes AD, DD′, D′A′ (*fig.* 1194), la série des tensions sera représentée par une ligne brisée telle que BNN′B′, et les chutes électriques dans les différentes parties, seront égales à tang α, tang α', tang α''. La formule s'appliquera à ce cas, en représentant par R la somme des résistances des parties AD, DD′, D′A′. — Enfin, s'il y a dans le circuit, des électrolytes, des espaces à franchir sous forme d'étincelle ; si l'on suppose, comme cela a lieu en effet, que la pile présente une certaine résistance au mouvement de l'électricité qu'elle engendre, la formule s'appliquera toujours, en représentant par R la somme de toutes les résistances du circuit, y compris celle de la pile.

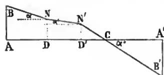


Fig. 1194.

1620. FORMULE DES PILES. — Il résulte de ce qui précède que l'intensité I d'un courant qui circule dans un fil conjonctif homogène de longueur L, peut être représentée par la formule $I = \frac{E}{L + r}$, en désignant par r la longueur

du fil représentant la résistance de la pile ou sa *longueur réduite*, et par E la *force électromotrice*, mesurée par la tension aux pôles quand le circuit est ouvert. On voit que si l'on suppose la résistance de la pile insensible, comme cela a lieu pour un couple thermo-électrique à grande section, on a $I = \frac{E}{L}$, c'est-à-dire que l'intensité du courant est en raison inverse de la longueur du fil homogène. Si, au contraire, la pile présente une résistance sensible, comme cela a lieu pour les piles hydro-électriques, la formule montre que l'*intensité du courant est en raison inverse de la longueur du fil augmentée d'une quantité constante r*, qui représente la résistance particulière de la pile. Cet énoncé s'applique aussi au cas de plusieurs résistances différentes interposées dans le fil conjonctif; L exprime alors la somme des longueurs réduites équivalentes à ces résistances.

Intensité donnée par plusieurs couples. — Supposons que dans la formule $I = \frac{E}{L+r}$, E et r soient la force électromotrice et la résistance d'un seul couple, L et r étant toujours représentés par des longueurs d'un même fil pris pour terme de comparaison; et considérons plusieurs couples réunis les uns à la suite des autres. M. Ohm admet que chacun d'eux produit un courant qui traverse la pile, comme si ce couple était seul, de manière que la force électromotrice, ou la tension aux pôles qui la mesure, serait la somme $\Sigma . E = E + E' + E'' \ldots$ des forces électromotrices de ces couples. En outre, le courant produit par chaque couple ayant à traverser tous les autres, trouve une résistance égale à la somme $\Sigma . r = r + r' + r'' \ldots$ des résistances de chacun d'eux; on aura donc :

$$[1] \quad I = \frac{E + E' + E'' + \ldots}{L + r + r' + r'' + \ldots} = \frac{\Sigma . E}{L + \Sigma . r} \text{ ; qui devient } I = \frac{nE}{L + nr} \quad [2]$$

quand les couples sont égaux entre eux et en nombre n. Ces formules expriment que l'intensité du courant est proportionnelle à la somme des forces électromotrices des couples, et en raison inverse de la résistance *totale* du circuit, en y comprenant la pile.

Discussion. — La formule [2] montre que : 1° l'intensité du courant augmente avec le nombre des couples; car, en divisant les deux termes par n, on voit que la valeur de I croît en même temps que n. — 2° L'*augmentation* est d'autant plus sensible que L est plus grand par rapport à r, c'est-à-dire que les résistances à vaincre dans la partie extérieure du circuit sont plus considérables. Si, au contraire, L est très petit, les variations du terme $L : n$ sont elles-mêmes très petites quand n varie, et l'intensité du courant change peu avec le nombre des couples. — 3° S'il n'y avait aucune résistance extérieure, on aurait $L = 0$, et $I = \frac{nE}{nr} = \frac{E}{r}$. L'intensité serait donc toujours la

même qu'avec un seul couple ; ce que nous avons déjà déduit de considérations toutes différentes (1454, 1568). — 4° L'intensité reste la même, quand chaque couple que l'on ajoute est accompagné d'une résistance extérieure égale à L, ou, en d'autres termes, quand la résistance augmente proportionnellement au nombre des couples ; car la formule devient alors $I = \frac{nE}{nL + nr} = \frac{E}{L + r}$. — 5° Si la résistance extérieure L est très grande, I est très petit, à moins que n ne soit aussi très grand ; ce qui montre qu'il faut employer un grand nombre de couples quand on a de grandes résistances à vaincre, comme dans l'électrolyse des corps peu conducteurs, quand on veut produire l'arc voltaïque, etc.

Si, au lieu de réunir plusieurs couples les uns à la suite des autres, on en réunit un nombre m par les pôles de même nom, de manière à former un couple unique, la résistance sera $r : m$, puisque la section sera m fois plus grande (1616), et la formule deviendra $I = E : \left(L + \frac{r}{m}\right)$. On voit que si L est très grand, l'intensité augmente à peine avec m ; mais si L est très petit, l'intensité s'accroît notablement, et elle devient proportionnelle à la surface du couple, quand L est négligeable. Nous savons, en effet, que l'action chimique s'exerçant sur une plus grande surface, la quantité d'électricité qui parcourt le fil conjonctif est plus considérable (1568).

Supposons enfin que l'on augmente en même temps le nombre et l'étendue des éléments, de manière que leur nombre soit mn, on aura

$$I = \frac{nE}{L + \frac{nr}{m}} = \frac{E}{\frac{L}{n} + \frac{r}{m}}$$

ce qui montre que, en augmentant le nombre des éléments, on produit le même effet que si l'on diminuait dans le même rapport la résistance du circuit extérieur, et que, augmenter leur surface, revient à diminuer la résistance de la pile. Si L est très grand, il y a avantage à réunir les couples les uns à la suite des autres, et s'il est très petit, il est préférable de les réunir pôle à pôle, de manière à former des couples à grande surface.

1621. Application au réomètre. — Quand on introduit un réomètre multiplicateur dans un circuit, le fil de l'instrument ajoutant sa résistance à celle du circuit, le courant s'affaiblit. L'affaiblissement est d'autant plus grand que le fil du réomètre est plus fin et plus long ; et, quoique l'action sur l'aiguille soit répétée autant de fois qu'il y a de tours, il peut arriver, si la résistance primitive du circuit est faible, que cette aiguille soit moins déviée que ne le serait une simple aiguille aimantée. Il ne faudra donc employer un multiplicateur à grand nombre de tours qu'autant que le circuit extérieur présentera une grande résistance. En effet, soit I l'intensité d'un courant, I' celle qu'il présente quand on interpose un multiplicateur dont le fil fait m tours ; I et I' étant donnés par un réomètre à un seul tour emprunté au circuit primitif.

Soit aussi L la longueur réduite qui représente la résistance primitive du circuit, et l la longueur réduite d'un tour du réomètre. Quand cet instrument sera introduit, la longueur totale du circuit sera $L+ml$, et l'on aura $(L+ml)I'=L.I$. Si M représente l'action du multiplicateur sur son aiguille, on aura aussi $M=mI'$, et remplaçant I' par sa valeur,

$$M=mI\frac{L}{L+ml}=mI\frac{1}{1+\frac{ml}{L}}.$$

Si L est très grand par rapport à ml, comme cela a lieu quand le courant est fourni par une pile hydro-électrique à plusieurs couples, on peut négliger $(ml : L)$ devant 1, et il vient $M=mI$. Le réomètre donne alors des intensités proportionnelles au nombre de tours, et sa sensibilité est maximum. Si $(ml : L)$ n'est pas négligeable, la valeur de M s'abaisse au-dessous de mI, à mesure que le nombre m de tours augmente. Ce qui ne veut pas dire que la sensibilité diminue; car M, au-dessous de son maximum mI, peut avoir une valeur supérieure à celle qui correspondrait à un moindre nombre de tours, quoique celle-ci s'approchât davantage de son maximum. Si l augmente, c'est-à-dire si la résistance qui correspond à chaque tour augmente, M diminue, et d'autant plus que L est plus petit. Si L est assez petit pour être négligé devant ml, on aura sensiblement $M=I\,(L : l)$; la sensibilité sera donc en raison inverse de l, et indépendante du nombre de tours. En effet, le circuit n'étant alors composé que par le fil du réomètre, l'intensité du courant varie en raison inverse, et l'action sur l'aiguille, en raison directe de sa longueur. Il résulte de là qu'il faudra employer un fil gros, pour que l soit petit, quand on aura affaire à une pile à faible résistance, et qu'il sera inutile dans ce cas de faire un grand nombre de tours. Il résulte aussi de ce qui précède, qu'il faut toujours, dans une même série d'expériences, se servir du même réomètre ; et que, sauf le cas où la résistance du circuit est d'avance très grande, il faut tenir compte de celle de l'instrument.

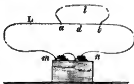


Fig. 1195.

1622. Courants dérivés. — Si l'on joint par un fil métallique alb (*fig.* 1195) deux points a, b d'un autre fil parcouru par un courant, ce courant se divise aux points de jonction; la partie qui passe dans le fil alb se nomme *courant dérivé*, et ce fil, *fil de dérivation*. Le fil $mabn$ est le *circuit principal*, et ab, l'*intervalle de dérivation*. Il est évident que le courant en ab sera moins intense que dans toutes les autres parties du circuit principal, mais on voit aussi que le courant primitif sera augmenté en dehors des points a et b, la présence du fil de dérivation diminuant la résistance du circuit total entre ces deux points. Proposons-nous donc de déterminer, en partant des conditions du courant primitif, les

valeurs 1° du courant dérivé, 2° du courant dans l'espace *ab*, 3° du courant principal dans les parties extérieures au point de dérivation.

Soit I l'intensité du courant primitif, et L, la longueur réduite de toutes ses parties, y compris la pile *mn* ; I′ son intensité après l'addition du fil de dérivation ; *i* l'intensité dans l'espace $ab=d$; et enfin D l'intensité du courant dérivé, et *l* sa longueur réduite, c'est-à-dire la longueur qu'il aurait s'il avait la même section *s* et la même conductibilité que le fil qui a servi à calculer le nombre L. Au lieu du fil de longueur *l*, nous pourrons prendre un fil de longueur *d*, à la condition de lui donner une section *s′* telle que l'on ait $ds=ls'$ (1617). On peut alors considérer les points *a*, *b* comme réunis par deux fils de même longueur *d*, et ayant pour sections *s* et $s'=sd:l$, ou par un seul fil de section $s+s'=\frac{s(l+d)}{l}$ (1597). Ce fil de longueur *d* revient lui-même à un fil unique de section *s* et de longueur moindre *x*, telle que l'on ait $x(s+s')=sd$, d'où $x=\frac{sd}{s+s'}=\frac{ld}{l+d}$. On peut donc, au lieu des deux fils qui joignent les points *a* et *b* du circuit principal, considérer un fil unique de longueur *x* plus petite que *ab*, ce qui diminue la longueur L de ce circuit, de la quantité $d-x$. L'intensité du courant primitif sera donc augmentée, et prendra la valeur I′ donnée par la proportion $I':I=L:L-(d-x)$;

$$\text{d'où} \qquad I'=I\,\frac{L}{L+x-d}=I\,\frac{(l+d)L}{(l+d)L-d^2}. \qquad [1]$$

Pour obtenir les intensités *i* et D du courant en *ab* et du courant dérivé, remarquons que ces intensités ont une somme égale à I′ (1596), et qu'elles sont entre elles comme les sections *s* et $s'=sd:l$ qu'auraient les deux fils sous la même longueur *d* ; on a donc $i+D=I'$, et $Dl=di$. Tirant *i* et D de ces deux équations, et remplaçant I′ par sa valeur [1], il vient :

$$i=I\frac{Ll}{(l+d)L-d^2}, \quad \text{et } D=\frac{Ld}{(l+d)L-d^2} \qquad [2]$$

valeurs qui sont entre elles en raison inverse des longueurs réduites *d* et *l* qui leur correspondent. On voit aussi que l'intensité du courant dérivé est proportionnelle à la distance de dérivation *d*.

Discussion. — Si les longueurs réduites *d* et *l* étaient égales, le courant devrait se partager également entre les deux fils *ab*, *alb*, et présenter dans chacun d'eux une intensité égale à $\frac{1}{2}$ I′. C'est, en effet, ce que montrent les formules ; car en y remplaçant *l* par *d*, il vient

$$I'=I\frac{2L}{2L-d}, \quad \text{et} \quad i=D=I\frac{L}{2L-d}. \qquad [3]$$

On peut trouver la première valeur directement, en remarquant que, introduire

le fil l égal à d, revient à diminuer de moitié la distance d, ou à remplacer L par $L - \frac{1}{2} d$. Si nous supposons d très petit par rapport à L, en divisant par L les deux termes des valeurs de I′, i et D, et négligeant $d^2 : L$, il vient $I' = I$, $i = I \frac{l}{l+d}$, $D = I \frac{d}{l+d}$. Le courant primitif n'est donc pas sensiblement altéré, et les valeurs de i et de D conservent le même rapport. Si, de plus, d est nul, il vient $I' = I$, $i = I$, $D = 0$. Dans ce cas, les points de dérivation se confondent, et il était facile de prévoir les résultats.

Supposons maintenant que les points de dérivation soient aux pôles de la pile, et séparons la longueur réduite r, qui correspond à la pile, de la longueur totale L. Alors la résistance du circuit extérieur seul sera représentée par $L - r$, et nous aurons $d = L - r$; les formules [1] et [2] deviennent donc

$$[4]\quad I' = I \frac{(l + L - r)L}{(L-r)r + Ll}, \quad i = I \frac{Ll}{(L-r)r + Ll}, \quad D = I \frac{L(L-r)}{(L-r)r + Ll}$$

I′ est, dans ce cas, l'intensité dans la pile, i et D les intensités dans les deux fils qui joignent ses pôles. Si nous supposons $r = 0$, c'est-à-dire si la pile n'offre pas de résistance, comme cela a lieu pour un couple thermo-électrique, nous aurons $I' = I \frac{L + l}{l}$, $i = I$, $D = \frac{I}{l}$. Ainsi, le courant n'est pas modifié dans le circuit primitif d, mais il passe en outre de l'électricité dans le fil de dérivation, avec une intensité en raison inverse de sa longueur l, ce qui fait que l'intensité du courant *dans la pile* est modifiée.

Considérons enfin le cas où les points de dérivation étant aux pôles, on a $l = d = L - r$; il vient, en remplaçant par $L - r$, l dans les formules [4], ou d dans les formules [3],

$$I' = I \frac{2L}{L + r}, \quad i = D = I \frac{L}{L + r}.$$

Si en même temps on a $r = 0$, il vient $I' = 2I$, $i = D = I$, résultats faciles à interpréter, et qu'on pourrait trouver directement. M. Pouillet, qui s'est beaucoup occupé des courants dérivés, a vérifié par l'expérience la plupart des résultats donnés par les formules qu'il a obtenues.

1623. Vérifications expérimentales. — Les lois et les formules de M. Ohm étant basées sur des considérations théoriques en partie hypothétiques, il était important de les vérifier par l'expérience. C'est ce qu'ont fait plusieurs physiciens. Dès 1826, M. Ohm avait soumis la formule $I = A : (L + r)$ au contrôle de l'expérience. Il employait une pile thermo-électrique, dont les soudures étaient alternativement à 0° et à 100°. L'intensité du courant était mesurée par la torsion qu'il fallait donner au fil de suspension d'une aiguille aimantée, pour la maintenir dans la direction du courant. Le fil conjonctif avait successivement des longueurs différentes. Pour chacune d'elles on commençait

par calculer les constantes A et r. Pour cela, on observait deux valeurs de I, $I_1 = A : (L + r)$, $I_2 = A : (L' + r)$, on tirait les valeurs de A et r, qu'on portait dans la formule générale. Voici quelques nombres trouvés par ce moyen :

Longueur des fils en pouces....	0	4	6	10	18	34	66	130
Valeurs de I par expérience..	305	282	258,25	223 5	178	121,75	78	44
Id. déduites de la formule.	305,5	280,5	259	224,75	177,75	125,5	79	45

Les résultats consignés dans les deux dernières lignes présentent un accord suffisant, quand on considère les difficultés de ces sortes d'expériences.

M. Ohm n'avait guère expérimenté qu'avec des piles thermo-électriques, lorsque, en 1831, M. Fechner publia, sous le titre : *Résultats numériques d'observations de la pile galvanique*, un grand travail expérimental dans lequel il a vérifié les lois de Ohm, les formules des piles à un ou plusieurs couples, et les cas particuliers que nous avons discutés (1620). Les constantes étaient déterminées dans chaque cas, par des observations en nombre égal, faites en donnant différentes valeurs aux quantités susceptibles d'être évaluées directement, comme la longueur du circuit extérieur, le nombre des couples, et mesurant l'intensité du courant, par la méthode des oscillations (1607). Il a aussi retrouvé par l'expérience les propriétés des courants dérivés, et son travail constitue un ensemble tellement remarquable, que les lois de Ohm, qu'il avait pour but de retrouver par l'expérience, sont quelquefois désignées sous le nom de *lois de Fechner*. Ces expériences présentaient, à l'époque où elles ont été faites, de grandes difficultés, parce qu'on ne connaissait pas alors les piles à courant constant. M. Fechner attendait que la pile, dont il maintenait le circuit fermé, se fût affaiblie, de manière que la diminution d'intensité fût peu prononcée (1460), et il employait la méthode des alternatives (1301). M. Lenz et M. Jacobi ont aussi vérifié les lois de Ohm, par des méthodes analogues.

Vers 1838, M. Pouillet trouvait, de son côté, comme nous l'avons déjà dit, toutes les lois des intensités des courants, par la méthode expérimentale, si bien qu'on les désigne aussi sous le nom de *lois de Pouillet*. Cet habile physicien a d'abord reconnu que l'intensité du courant d'un couple thermo électrique, dont la résistance est négligeable, est en raison inverse de la longueur du fil interpolaire. Il a opéré ensuite avec un couple à courant constant de Daniell, et a trouvé que l'intensité est en raison inverse de la longueur du fil interpolaire, augmentée d'une quantité constante. Il observait d'abord l'intensité du courant, quand il passait directement dans une boussole des tangentes, puis il ajoutait successivement des paquets de fils de longueur connue, L, L', L''... Admettant ensuite que les longueurs réelles du circuit étaient successivement x, $L + x$, $L' + x$, $L'' + x$..., il déterminait x au moyen de deux observations *quelconques*, en écrivant que les intensités sont entre elles comme ces dernières longueurs. Or, la valeur de x était toujours la même, quelles que fussent les deux longueurs de fil interposées successivement. x représente la résistance

propre du couple et de la boussole des tangentes, exprimée en longueur d'un fil de même espèce que le fil interpolaire. M. Pouillet a aussi trouvé par l'expérience les formules des piles. Il a constaté qu'un seul couple donne un courant de même intensité que plusieurs couples placés les uns à la suite des autres, quand ce courant ne traverse que la boussole des tangentes dont la résistance est négligeable (1620). Il a encore trouvé et vérifié par un grand nombre d'expériences, les formules des courants dérivés [1].

La loi de la pile suppose que la résistance intérieure de la source d'électricité reste la même, quelle que soit l'intensité du courant. Or, cette résistance est compliquée par celle qui a lieu au passage de l'électricité, des lames métalliques dans les liquides, et réciproquement (1559). D'aprés M. Marié-Davy, cette dernière résistance changerait avec l'intensité du courant ; d'où il résulterait que la formule des piles, telle qu'elle a été établie par MM. Ohm, Fechner, Pouillet...., ne serait pas complètement exacte. Des observations directes ont aussi conduit le même expérimentateur à la même conclusion [2]. Ces résultats ayant jeté des doutes dans quelques esprits, M. Despretz a soumis de nouveau la formule des piles au contrôle de l'expérience, en s'entourant de toutes les précautions possibles [3]. Dans ces nouvelles expériences, cet habile physicien mesurait les intensités des courants d'une pile de Daniell, au moyen de sa boussole des tangentes perfectionnée (1612). Pour calculer la résistance, il comparait l'intensité I dans le circuit composé de la pile et de la boussole seulement, à l'intensité i, après l'introduction d'un fil additionnel de longueur l. Si R est la résistance de la pile et de la boussole réunies, on a $I : i = R + l : R$; d'où $R = \frac{li}{I - i}$. Cette formule donnait la valeur de la résistance, au moyen de deux observations faites, l'une avec la boussole seule, l'autre en introduisant dans le circuit un fil de 10 ou de 80 mètres. La moyenne des valeurs de R obtenues avec le fil de 80^m s'est trouvée constamment supérieure de $\frac{1}{139} = 0{,}0072$, à la moyenne des valeurs obtenues avec le fil de 10 mètres. Ainsi, la résistance est un peu plus grande avec le courant le plus fort. M. Despretz explique cette différence par ce qu'il nomme l'*empâtement* du zinc de la pile : le sulfate qui prend naissance à la surface de la lame de zinc ne se dissout pas immédiatement, et forme une couche peu conductrice qui affaiblit d'autant plus le courant, qu'elle se forme plus rapidement, c'est-à-dire que le courant est plus intense. Un fait vient à l'appui de cette explication, c'est que les piles très énergiques présentent un accroissement d'intensité après la rupture du circuit, pendant laquelle le sulfate de zinc a le temps de se dissoudre. M. Despretz conclut de ses recherches, que l'intensité d'un courant est bien en raison inverse de la résistance totale du circuit, mais que la con-

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. IV, p. 257.

[2] *Ann. de ch. et de phys.*, 3e série, t. XIX, p. 410; et XXII, p. 401.

[3] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XXXIV, p. 781.

stance de la résistance de la pile n'est pas rigoureusement vraie, à cause de l'empâtement du zinc dans les piles très énergiques. Cet inconvénient est d'autant moins sensible que les piles sont plus faibles. Les lois de Ohm sont donc exactes en elles-mêmes; mais il faut, quand on veut les vérifier, écarter toutes les causes accidentelles qui peuvent les déguiser en altérant les résultats. Du reste, ces lois importantes ont trouvé une nouvelle confirmation dans les recherches publiées, en 1853, par M. Kohlrausch, qui a vérifié par l'expérience les lois de la distribution des tensions dans le fil conjonctif, et la proportionnalité de la *chute électrique* à la résistance spécifique et au rapport renversé des sections (1619); vérification importante, puisqu'elle touche à la base même de la théorie de M. Ohm.

1624. Vérification de la loi des tensions dans le fil conjonctif [1]. — Pour observer les tensions aux différents points d'un fil conjonctif, M. Kohlrausch se servait d'un condensateur à lame d'air dont l'épaisseur très petite était déterminée par trois petits amas de gomme laque. Une fois le condensateur chargé, il enlevait l'un des plateaux et mettait l'autre en communication avec un électromètre analogue à celui de Peltier (1323) ; l'aiguille mobile était suspendue par un fil de verre, dont la torsion servait à mesurer les tensions électriques.

M. Kohlrausch a d'abord cherché si la tension aux pôles de la pile est bien proportionnelle à la force électromotrice E de la formule de Ohm. Pour cela, il réunissait les pôles par un fil conjonctif, puis, au bout de quelque temps, il rompait le circuit et mettait les deux bouts du fil en communication avec les deux plateaux du condensateur ; celui-ci se chargeait aussitôt au maximum, et il mesurait la charge avec l'électromètre. La force électromotrice était évaluée par la méthode de M. Wheatstone, que nous décrivons plus loin. Voici quelques-uns des résultats :

Nature des couples....	Zinc et platine.	Zinc et charbon.	Zinc et cuivre.	Argent et cuivre.
Force électromotrice..	28,22	26,20	18,83	18,88
Tension aux pôles....	28,22	26,15	14,08	14,27

Le cuivre et le zinc étaient plongés dans une solution de sulfate du même métal; le platine ou le charbon, dans l'acide nitrique ; et l'argent, dans une solution de sel marin. On peut conclure de ces résultats, que *la force électromotrice est proportionnelle à la tension aux deux extrémités du fil d'un circuit, au moment où il vient d'être rompu.*

Pour étudier les tensions aux différents points du circuit *fermé*, le même physicien fit communiquer avec le sol un point de ce circuit ; puis, avec le condensateur, deux points placés à égale distance du premier, et il mesura les tensions de ces deux points. Ces tensions étaient égales, mais produites par des électricités contraires, et de plus proportionnelles aux distances des

[1] *Bibl. de Genève* (Arch. des sc.), t. XXII, p. 105, et *Ann. de ch. et de ph.*, 3e série, t. XLI, p. 337.

points considérés. — Dans une seconde série d'expériences, deux fils d'argent de diamètre différent, ou deux fils de même diamètre et de substance différente, furent soudés l'un au bout de l'autre ; le point de jonction étant en communication avec le sol, les tensions à égale distance de ce point se trouvèrent en raison inverse des sections, ou en raison inverse des conductibilités, et par conséquent en raison directe des résistances spécifiques des fils, comparées par des moyens que nous indiquerons bientôt. Des expériences analogues, faites sur des liquides, ont donné de semblables résultats.

On peut calculer facilement l'état de tension de chaque point du circuit, au moyen de la construction de Ohm ; car, soit AA′ (*fig.* 1196) la longueur réduite du circuit, et C le point mis en communication avec le sol, point qui n'est pas nécessairement au milieu de AA′. La tension en un point n sera égale à np. Or, on a $np = pC$ (AB : AC), ou $np = pC$ (E : AC). Pour avoir la tension en un point, il faudra donc multiplier la force électromotrice par la distance du point considéré au point qui communique avec le sol, et diviser le produit par une quantité AC proportionnelle à la longueur réduite du circuit. Les résultats obtenus par cette méthode de calcul ont été comparés avec ceux de l'expérience. Le circuit était composé d'un fil métallique très long communiquant, au moyen d'une lame de cuivre, avec une auge remplie d'une solution de sulfate de cuivre. Dans cette auge était un vase poreux plein d'une solution de sulfate de zinc, dans laquelle plongeait une lame de zinc, de manière à compléter un couple de Daniell. Le point mis en communication avec le sol était le pôle négatif, c'est-à-dire la lame de zinc ; de sorte que tout le circuit contenait du fluide positif. Les points successivement explorés au moyen du condensateur, furent d'abord 3 points, 1, 2, 3, pris sur le fil à des distances croissantes de la lame de zinc, puis le point de jonction, 4, du fil avec la lame de cuivre ; enfin, 3 points, 5, 6, 7, pris dans le sulfate de cuivre à des distances de 2,02, 4,02, 8 pouces de cette lame. Dans le tableau suivant, la seconde ligne représente les longueurs réduites, D, des parties du circuit comprises entre la lame de zinc et le point touché :

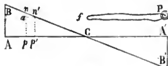


Fig. 1196.

Points touchés. . . .	1	2	3	4	5	6	7	8
Valeurs de D.	118,5	237	355,5	474	610,3	745,3	879	1014
Tensions calculées. . .	0,93	1,86	2,89	[illegible]	4,80	5,86	0,91	7,98
Tensions observées. .	0,85	1,85	2,69	3,70	5,03	5,99	6,93	7,96

Si l'on considère les incertitudes de la méthode de mesure des tensions, on voit que l'accord entre les résultats inscrits dans les deux dernières lignes ne pouvait être plus satisfaisant. Les formules de Ohm se trouvent donc démontrées

expérimentalement, et il en est de même des hypothèses qui ont servi de point de départ pour les établir.

Tensions aux différents points d'une plaque. — Les expériences qui précèdent sont relatives à l'état des tensions dans un conducteur linéaire. M. Kirchoff a soumis les hypothèses de Ohm à l'épreuve, dans le cas où le conducteur est une large lame d'épaisseur négligeable [1]. Il a déterminé par le calcul analytique, l'état stationnaire des tensions aux différents points de la plaque, et cherché la forme des *courbes d'égale tension* (analogues aux lignes isothermes pour la chaleur), en s'appuyant sur cette condition, conséquence immédiate du principe de M. Ohm (1618), qu'il n'y a aucun mouvement d'électricité d'un point à l'autre de chacune de ces courbes, et que l'électricité se meut dans une direction qui leur est toujours normale. Dans le cas d'une plaque indéfinie ou limitée par une courbe d'égale tension, dans laquelle les électricités arrivent par deux points, le calcul indique que les courbes d'égale tension sont des circonférences ayant leur centre sur la ligne qui joint les électrodes, et telles que le rapport des distances de chacun de leur point aux électrodes soit constant. Les courbes normales aux précédentes sont tous les cercles qu'on peut faire passer par les électrodes. Ces résultats sont applicables à une lame circulaire, dans laquelle les électricités pénètrent par deux points du contour. M. Kirchoff les a vérifiés par l'expérience sur une plaque circulaire en cuivre de 33^{cm} de diamètre. Il appuyait en deux points, les extrémités du fil d'un réomètre, et quand l'aiguille n'était pas déviée, il était sûr de toucher deux points d'une même courbe. Il a aussi calculé l'expression analytique des tensions aux divers points, et l'a vérifiée par l'expérience. Pour cela, il faisait passer entre deux points, un courant thermo-électrique en sens contraire du courant qui traversait la plaque ; le courant de la plaque entre les points touchés était égal au courant thermo-électrique, quand un réomètre placé dans ce dernier restait au repos, et l'on trouvait ainsi une série de couples de points pour lesquels la différence de tension était constante. Quant à la résistance, elle a toujours été trop faible pour qu'on pût vérifier son expression analytique. — Enfin, M. Kirchoff a calculé, par la théorie, les déviations d'une aiguille aimantée placée très près des différents points du disque réophore, et les a trouvées d'accord avec celles que lui a données l'expérience. L'aiguille, suspendue par un faisceau de fils de soie sans torsion, était formée d'un fil d'acier de 2 centimètres de longueur, fixé à un petit miroir au moyen duquel on mesurait les déviations par la méthode de M. Gauss (1,435).

M. Kirchoff n'a considéré que des plaques circulaires. M. G. Quincke a examiné deux cas un peu plus compliqués : 1° celui d'une plaque carrée dans laquelle les électrodes communiquent avec un des angles, et avec un point de la diagonale passant par cet angle ; 2° celui d'un disque dont une moitié était en plomb et l'autre en cuivre, l'électricité arrivant par deux points pris sur le

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XL, p. 115, et t. XLI, p. 496.

même métal à égale distance du diamètre de soudure. Les résultats de l'expérience ont toujours été d'accord avec ceux du calcul. — Nous ajouterons enfin que M. Smaasen, en 1846, a traité par le calcul le cas général de la propagation dans un conducteur à trois dimensions [1].

1625. Vérifications avec l'électricité de frottement. — Les lois de Ohm n'avaient été vérifiées que sur des circuits bons conducteurs, et avec l'électricité des piles. Il était important de les vérifier sur l'électricité des machines à frottement, quand cette électricité, qui tend, dans l'état de repos, à se porter à la surface des corps (1296), s'écoule lentement dans le sol par un conducteur médiocre, comme un fil de coton, un ruban de soie, une colonne d'huile, etc. C'est ce qu'a fait M. Gaugain par deux méthodes différentes [2], et il a reconnu que les lois de Ohm s'appliquent à ce cas, ce qui prouve qu'il n'y a qu'un seul mode de propagation de l'électricité.

La première méthode employée consiste à mesurer le temps pendant lequel l'électricité doit s'écouler par un fil de coton, pour que la tension du corps électrisé diminue d'une quantité donnée. Le corps électrisé était le plateau collecteur d'un condensateur, dont l'autre plateau communiquait avec le sol. La tension sur le premier plateau était indiquée par l'écart des feuilles d'or d'un électroscope, écart observé sur un arc divisé, au moyen d'une disposition analogue à celle qu'on emploie dans l'électromètre de Peclet (1324). Après avoir attendu que l'écoulement eût pris sa marche définitive, on observait, dans chaque cas, le temps que mettaient les feuilles d'or à passer, d'un écart de 20° à un écart de 17° ; et la perte d'électricité par écoulement pendant une seconde, était en raison inverse de ce temps ; or, le temps était double, triple, quand le fil de coton communiquant avec le sol avait une longueur double, triple. — Cette méthode suppose qu'il n'y a pas de perte par l'air ; ce que l'on peut admettre si l'on opère sur de faibles tensions, et si l'écoulement est rapide, comme il l'est, en effet, quand le réservoir d'électricité est un condensateur.

Dans la seconde méthode, on faisait aboutir le fil de coton au bouton d'un second électromètre, dont les feuilles d'or se déchargeaient d'autant plus rapidement, en touchant les lames de décharge (1482), que le flux électrique était plus rapide. Dans ce cas, on maintenait constante la charge du réservoir, ou l'écart des feuilles du premier électromètre, en lui fournissant de l'électricité par le contact d'une aiguille isolée que l'on chargeait avec un électrophore. Le flux électrique serait alors proportionnel au nombre de décharges, par minute, si la tension moyenne de l'électroscope de décharge était indépendante de la rapidité des décharges, ce qui n'est pas évident. C'est pourquoi M. Gaugain s'est arrangé de manière à avoir toujours des décharges de même rapidité. Ayant d'abord fait communiquer les électroscopes par un fil de coton de $1^m,64$ de longueur, il les a ensuite fait communiquer par

[1] *Annales de chimie et de physique*, t. XLV, p. 203, et XL, p. 236.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LIX, p. 9.

deux fils de même grosseur et de longueur double, et a vu que la rapidité des décharges n'était pas changée. Chaque fil de longueur double laissait donc passer la moitié du flux électrique que laissait passer le fil de $1^m,64$; ce qui vérifie la loi des longueurs.

Quand la tension du réservoir est réduite de moitié, la rapidité des décharges avec *deux fils* de $1^m,64$ reste encore la même ; ce qui prouve que l'écoulement est proportionnel à la tension, celle de l'électromètre de décharge étant supposée négligeable.

Pour vérifier la loi des tensions aux différents points du fil communiquant avec le sol, on place en son milieu un second électroscope identique avec le premier, et qui donne un écart moindre *d*. On reconnaît que cet écart correspond à une tension *moitié moindre*, en rétablissant la tension du premier instrument, déchargeant le second, et mettant leurs boutons en contact; ils se partagent l'électricité du premier, et chacun d'eux présente l'écart *d*.

M. Gaugain, ayant reconnu que plusieurs fils de coton égaux donnent le même nombre de décharges quand ils sont serrés en faisceau ou écartés les uns des autres, et qu'il en est de même d'un ruban de soie étendu ou roulé en tube, en a conclu que la résistance ne dépend pas de la surface libre, mais seulement de l'étendue de la section, à laquelle elle est inversement proportionnelle, comme pour les courants des piles. Des expériences faites avec des colonnes d'huile contenues dans des auges en gomme laque, ont conduit au même résultat.

1626. Charge dynamique. — La loi qui précède prouve que le mouvement électrique se fait également par tous les points de la section. Cependant une certaine quantité d'électricité se porte à la surface, en produisant une tension susceptible de se manifester par des attractions et répulsions. Voici comment M. Gaugain prouve l'existence de cette *charge dynamique*, ainsi qu'il l'appelle, et comment il la mesure. Il emploie l'électromètre de décharge et supprime brusquement la communication du fil avec l'instrument, au moment d'une décharge, puis il sépare ce fil du réservoir d'électricité, le fait de nouveau communiquer avec le réservoir de décharge, et évalue la charge qui lui restait, par les décharges qu'il donne en perdant l'électricité qu'il avait conservée. Il a trouvé ainsi, que cette charge, à section égale, dépend de la surface, et qu'elle est la moitié de la *charge statique*, c'est-à-dire de celle que prendrait le fil, si, étant isolé, il restait en communication avec le réservoir d'électricité. Il résulte de là qu'on ne peut dire que le flux électrique est rigoureusement le même dans tous les points de la section ; mais pour les conducteurs imparfaits et pour les faibles tensions des piles, l'influence de la *charge dynamique* est assez faible pour que les résultats paraissent les mêmes que si elle n'existait pas.

III. Etat variable dans un circuit qui vient de recevoir l'électricité.

1627. Dans tout ce qui précède, nous avons supposé que le courant électrique était complètement constitué, de manière qu'il passe par chaque section une même quantité d'électricité. Cet *état définitif* du courant est précédé d'un *état variable*, pendant lequel les différentes sections laissent passer des quantités différentes d'électricité, les plus rapprochées de la source en laissant passer plus que celles qui sont éloignées, et par conséquent plus qu'il n'en sort à l'extrémité du fil conducteur. M. Ohm a donné une formule qui fait connaître la tension en un point quelconque pendant l'état variable, qu'il a le premier signalé. Il compare ce qui se passe pendant cet état, aux premiers mouvements de la chaleur dans un mur solide dont une des faces est échauffée : d'abord, la chaleur est employée à échauffer les tranches successives, jusqu'à ce qu'elle arrive à la face froide, par laquelle il sort d'abord moins de chaleur qu'il n'en pénètre par la face opposée. Au bout d'un certain temps, chaque tranche possède une température constante ; toutes laissent alors passer la même quantité de chaleur, et l'on est arrivé à l'état définitif.

M. Gaugain, en employant des conducteurs médiocres, et en suivant les méthodes que nous avons décrites (1625), a pu augmenter la durée de l'état variable, de manière à pouvoir la mesurer. Il a trouvé que cette durée T est liée à la quantité d'électricité E, à la conductibilité c, à la longueur l, et à la section s du fil, par la relation

$$T = K\frac{El^2}{cs}$$

On voit que le temps est indépendant de la *tension* de la source, et qu'il est proportionnel au carré de la longueur.

1628. Etat variable dans les fils métalliques. — M. Gaugain n'ayant employé que des conducteurs imparfaits, dans lesquels le flux électrique se propage avec une lenteur relative, il était important de vérifier les résultats auxquels il est arrivé, sur des fils métalliques. Il fallait alors employer des circuits d'une très grande longueur, à cause du peu de durée de l'état variable. MM. C.-M. Guillemin et E. Burnouf ont profité, pour cela, des longs circuits des télégraphes électriques [1]. Voici d'abord le principe de la méthode qu'ils ont employée. Les deux extrémités du circuit étant près l'une de l'autre, on fait communiquer l'une d'elles avec le pôle positif d'une pile dont l'autre pôle communique avec le sol ; l'électricité s'élance dans le circuit, dont l'autre extrémité s'enfonce dans le sol. Un circuit dérivé contenant un rhéomètre, aboutit à deux points placés près de cette dernière extrémité ; on le ferme au bout de

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LX, p. 385.

quelques millièmes de seconde, et l'intensité du courant dérivé donne une quantité proportionnelle à l'intensité du courant direct au point de dérivation, à l'instant de la *fermeture du circuit dérivé*, qui reste fermé pendant un temps constant dans toutes les expériences. Puis on décharge le circuit par les deux bouts.

La *fig.* 1197 représente l'appareil au moyen duquel on peut exécuter avec sûreté ces diverses opérations. CD est un cylindre en bois, de 18cm de longueur et de 10cm de circonférence, que l'on fait tourner régulièrement au moyen d'une courroie sans fin qui passe sur une poulie g, et sur une roue à volant bien équilibrée, dont la vitesse se règle au moyen d'un taquet, qui à chaque tour frappe une tige flexible en produisant un bruit que l'on fait coïncider avec les chocs d'un pendule. Une vis sans fin V fait marcher un compteur K qui donne la vitesse. La pile est en P ; son pôle négatif communique avec le sol en t,

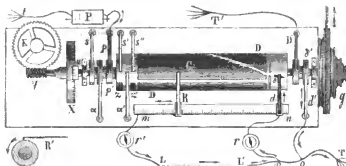


Fig. 1197.

et son pôle positif avec le ressort p, qui s'appuie sur une virole p' communiquant avec la lame métallique C, appliquée sur le cylindre. L'extrémité du fil de la ligne télégraphique LL', par laquelle entre l'électricité, est fixée en m à une règle métallique mn, et son autre extrémité communique en T avec le sol. En o, v sont les points de dérivation du circuit dérivé; l'intervalle de dérivation or est formé d'un fil fin et résistant, pour que la plus grande partie du courant soit détournée; le circuit dérivé est fermé, pendant $\frac{1}{1000}$ de seconde, au moment où le ressort isolé d s'appuie sur une petite lame triangulaire en métal δ, qui communique avec la virole δ', sur laquelle s'appuie le ressort d'. On peut faire varier la durée de la fermeture, en déplaçant le ressort d, sur la règle mn, dont il est isolé.

Voici la marche de l'opération ; le cylindre CD tournant, l'électricité s'élance dans le circuit LL', dès que le ressort R porte sur la lame C; cette électricité passe dans le sol en T, jusqu'à l'instant où la petite lame δ se plaçant sous le ressort d, le circuit dérivé $v\delta\delta'o$ se ferme, pendant $\frac{1^s}{1000}$. Le ressort R s'ap-

puie ensuite sur la lame de décharge DD qui communique avec la virole à ressort D′, par laquelle le fil de ligne LL′ est déchargé en T′, en même temps que par l'extrémité T. Le cylindre continuant à tourner, les mêmes phénomènes se reproduisent 10 à 20 fois par seconde, de manière que l'aiguille du réomètre *r*, recevant des impulsions répétées à courts intervalles, son aiguille prend une position fixe, qui fait connaître l'intensité du courant dérivé; et, par suite, celle du courant de la ligne *m*LL′ au moment où a lieu la dérivation. L'intensité du courant à son entrée est donnée par le réomètre *r′*.

Pour que le moment de la dérivation soit plus ou moins éloigné de l'instant où l'électricité s'élance dans le circuit LL′, le bord de la lame C est oblique aux arêtes du cylindre, et présente 70 dents ayant un côté parallèle aux arêtes, de manière que l'instant de la communication avec la pile est d'autant plus rapproché du moment où se ferme le circuit dérivé, que le ressort R est fixé sur la règle *mn*, plus près de l'extrémité étroite de la lame triangulaire C. L'arc compris sur la lame, pour chaque position du ressort R, s'évalue au moyen du cercle divisé X, dont le vernier *u* permet d'apprécier les minutes; on fait passer un courant faible dans l'appareil que l'on fait tourner lentement, et les instants où commencent les courants en LL′ et dans le circuit dérivé sont indiqués par les réomètres *r* et *r′* [1].

Des expériences nombreuses ont prouvé que des contacts de $\frac{1}{2880}$ de seconde sont assez intimes pour donner au réomètre une déviation indépendante de la vitesse, quand on a soin d'empêcher les ressorts de vibrer. C'est à quoi l'on arrive au moyen d'étouffoirs formés de ressorts en laiton, pressant par l'intermédiaire d'une vis garnie de peau de daim, sur l'extrémité des ressorts d'acier. Ces derniers ressorts sont horizontaux et terminés par une partie coudée R′ (*fig.* 1197). Il faut veiller attentivement à la perfection des contacts.

Voici les principaux résultats de nombreuses expériences faites sur les fils de fer de plusieurs lignes télégraphiques : 1° Le courant, à l'extrémité qui communique avec le sol, va en croissant et prend une valeur constante après 0s,02 environ pour un circuit de 570 kilomètres, et en employant une pile de Bunsen de 60 couples. Le nombre 0s,02, représente la durée de l'état variable. — 2° Près de la pile, le courant va au contraire en décroissant d'intensité pendant l'état variable; c'est que le flux électrique ne trouve pas d'abord, dans le fil à l'état neutre, la tension croissante qu'il rencontre ensuite à mesure que ce fil se charge. M. Despretz a constaté une marche semblable dans l'échauffement des couches supérieures d'une colonne liquide (II, 819). — 3° L'état permanent s'établit en même temps dans toutes les parties du fil; la déviation est alors plus forte près de la pile qu'à l'extrémité qui communique avec le sol, ce qui est dû aux pertes; en effet, la différence est d'autant plus grande que l'air est plus humide. — 4° La durée de l'état variable diminue quand la tension de la pile et la quan-

[1] Les ressorts *s*, *s′*, *s″*, *α*, *α′*, et les lames *z*, *z′* servent à varier les expériences, suivant différentes conditions, pour le détail desquelles nous renvoyons au mémoire de M. Guillemin.

tité d'électricité qu'elle fournit augmentent ; pour un nombre double de couples, cette durée diminue à peu près de $\frac{1}{10}$. — 5° Le temps nécessaire pour charger à son maximum un fil de 570 kilomètres, est égal à la durée de l'état variable ; et le fil met à peu près 4 fois plus de temps à se décharger qu'il n'en a mis à se charger. — 6° La durée de l'état variable croît moins vite que le carré de la longueur du circuit ; résultat contradictoire avec celui qu'a trouvé M. Gaugain au moyen de conducteurs imparfaits ; il y a donc là sujet à de nouvelles expériences.

1629. De la vitesse de l'électricité. — Il résulte de l'existence d'un état variable précédant l'état définitif du courant, qu'il y a beaucoup d'incertitude sur ce qu'on doit entendre par *vitesse* de l'électricité. Il paraît rationnel de prendre pour cette vitesse, le rapport entre la longueur du circuit et le temps au bout duquel le premier signe de la présence de l'électricité se manifeste à son extrémité. Mais, comme nous l'avons déjà dit (1606), ce temps dépend de la sensibilité des instruments employés. En outre, les changements de durée de l'état variable avec la tension de la source électrique, permet de soupçonner que le premier mouvement électrique pourrait bien arriver à une distance donnée, après un temps dépendant de cette tension. Quoi qu'il en soit, les belles expériences tentées pour mesurer la vitesse de l'électricité, ont eu pour résultat important de nous donner une idée de la rapidité extrême avec laquelle se propage le flux électrique.

§ 3. — MESURE DES CONDUCTIBILITÉS.

I. Conductibilité des solides.

1630. Constantes des piles. — Les formules de Ohm contiennent deux constantes : la *force électromotrice* de la pile qui fournit le courant, et la résistance des différentes parties du circuit, résistance qui dépend elle-même des dimensions de ces différentes parties et de leur *conductibilité*. Quand on veut employer les formules des courants, il faut avant tout connaître les valeurs de ces constantes. Nous allons nous occuper des moyens de les déterminer, en commençant par les conductibilités.

1631. Les premières recherches destinées à comparer les conductibilités des fils métalliques ont été faites par Van-Marum et Prietsley, puis par M. Harris et M. Riess, en comparant les longueurs de fil qui pouvaient être fondues par la décharge d'une batterie (1334). Mais cette méthode suppose que l'*échauffement* des fils est en raison inverse de leur conductibilité ; principe qui ne peut être démontré qu'après qu'on a mesuré cette conductibilité : il y a donc cercle vicieux. Heureusement que l'on peut comparer les conductibilités au moyen des courants voltaïques, sans se servir des effets calorifiques. Avant de faire connaître les méthodes employées par divers physiciens, nous allons

décrire des appareils dont on fait fréquemment usage dans ces sortes de recherches.

1632. Réostats. — Les méthodes que l'on emploie pour évaluer les conductibilités et les forces électromotrices exigeant que l'on compare les intensités des courants successifs, les imperfections des réomètres et les incertitudes de leurs indications ont conduit à imaginer un procédé avec lequel on n'a pas besoin de connaître les forces qui correspondent aux déviations de l'aiguille, et qui consiste à introduire dans le circuit la résistance, facile à calculer, d'un fil métallique, dont on fait varier la longueur de manière à toujours ramener l'aiguille à la même position. MM. Poggendorff, Jacobi et Wheatstone ont imaginé pour cela des instruments que M. Jacobi désigne sous le nom de *volta-agomètres*, ou simplement *agomètres ;* et M. Wheatstone sous le nom de *réostats*. M. Marié-Davy les appelle *empodiomètres*.

La *fig.* 1198 représente le réostat de M. Wheatstone : sur un cylindre en bois *o* est creusée une rainure en hélice, au fond de laquelle s'enroule un fil fin en cuivre, soudé par un bout à un anneau adapté *à la base* du cylindre, que M. Ruhmkorff fait en verre. L'autre bout du fil est fixé à un second cylindre en laiton parallèle au premier. On peut faire tourner les deux cylindres, dans le même sens et avec des vitesses égales, au moyen d'une manivelle *m* et d'un engrenage, de manière que le fil abandonne l'un d'eux, pendant qu'il s'enroule sur l'autre. Un index *o* fait connaître le nombre de tours et de fractions de tours.

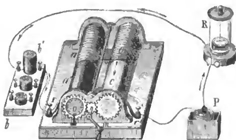


Fig. 1198.

Pour introduire l'appareil dans un circuit, on fait communiquer les fils de ce dernier avec des ressorts *r*, *r'*, qui glissent, l'un, *r'*, sur le cylindre de laiton, l'autre, *r*, sur l'anneau du cylindre de bois. Le courant parcourt alors tous les tours du fil du réostat dans la portion *a'* qui se trouve sur le cylindre de bois, passe de là au cylindre de laiton qu'il traverse immédiatement, en laissant de côté la portion de fil *c* qui l'enveloppe, et arrive au ressort *r'*. Les flèches indiquent la marche du courant ; P est la pile qui le fournit, et R un réomètre. On voit que, plus il y aura de fil enroulé sur le cylindre de bois, plus sera grande la longueur de fil introduite dans le circuit par le réostat. On pourra donc toujours, en faisant varier ainsi cette longueur, amener l'aiguille du réomètre dans une position déterminée.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. X, p. 265.

Quand on veut introduire une résistance très grande, qui dépasse les limites du réostat, on interpose, en outre, dans le circuit, une bobine b' de fil de cuivre enveloppé de soie, ayant une longueur et un diamètre connus. On a plusieurs bobines bb' portant des fils de différentes longueurs, et on peut les faire parcourir soit séparément, soit toutes ensemble par le courant, suivant la résistance dont on a besoin. Les dimensions des fils étant connues, on calcule facilement la résistance additionnelle qu'ils produisent.

La *fig.* 1199 représente le réostat de M. Jacobi. Sur un cylindre en bois à rainure en hélice, est enroulé un fil métallique, dont un des bouts est accroché à l'extrémité du cylindre, et l'autre soudé à une virole fixée à l'axe, et sur laquelle s'appuie un ressort *r*. Le courant arrive par le fil *f* qui communique avec le ressort *r*, et s'en va par le fil *f'* qui communique avec une barre métallique isolée *oo'* à section triangulaire. Cette barre est munie d'un curseur *c*, terminé par un petit ressort qui, pressant sur le fil dans la rainure, est déplacé comme un écrou, et glisse sur la barre *oo'* quand on fait tourner le cylindre au moyen de la manivelle *m*. La longueur de fil introduite par ce réostat est alors égale à la somme des tours de fil compris entre le curseur *c* et l'extrémité *r* du cylindre. — L'appareil de Viard (*fig.* 1137), constitue un véritable réostat, facile à construire et très commode dans beaucoup de cas. — M. Despretz a reconnu, lors de ses études sur les lois de Ohm (1623), une cause d'erreur importante dans l'emploi des réostats : les différentes parties d'un long fil présentant souvent des conductibilités différentes, la résistance introduite par l'instrument peut n'être pas proportionnelle à la longueur de fil enroulée sur le cylindre de bois. Il est donc nécessaire de vérifier l'identité dans toutes ses parties, du fil du réostat, avant de l'employer à des expériences délicates.

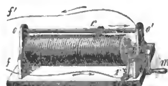


Fig. 1199.

L'*agomètre* de M. Jacobi ne comporte pas de semblables incertitudes ; la résistance est produite par une colonne de mercure, dans laquelle s'enfonce plus ou moins une tige de platine, de manière à faire varier la longueur de la colonne liquide que parcourt le courant. Les *fig.* 1203 et 1204 donnent une idée de la manière dont fonctionne cet appareil.

1633. Unité de résistance. — M. Jacobi a proposé aux physiciens de rapporter les réostats à une même unité, qui serait la résistance d'un fil de cuivre de 1 mètre de long et de 1 millimètre de diamètre. Mais comme le cuivre n'est pas toujours pur, et qu'il suffit même d'une différence de structure pour que sa conductibilité soit sensiblement différente, il a pris le parti d'envoyer à divers physiciens un fil de cuivre qu'il propose comme étalon, et à la résistance duquel ils ont pu comparer celle d'une longueur égale du fil de leur réostat. Ce fil étalon était renfermé dans une boîte dont sortaient ses extrémités

terminées par des boutons à vis. M. Jacobi a aussi proposé de prendre pour unité, une colonne de mercure distillé de dimensions déterminées ; le mercure pouvant toujours être obtenu pur, on aurait ainsi une unité facile à se procurer. M. Marié-Davy a pris pour unité de résistance, celle d'une colonne de mercure à la température de zéro, de 10 mètres de long et de 1 millimètre carré de section.

1634. CONDUCTIBILITÉ DES FILS MÉTALLIQUES. — H. Davy est le premier qui ait cherché à comparer les pouvoirs conducteurs des métaux pour l'électricité voltaïque. Plus tard, M. Becquerel a publié un travail sur le même sujet. Ces deux physiciens ont employé les procédés qui leur ont servi à établir les lois de la résistance des fils (1615) ; seulement, au lieu de comparer des fils de même substance, ils comparaient des fils de substances différentes.

Expériences de M. Pouillet. — M. Pouillet a mesuré les conductibilités de divers métaux, au moyen de ses deux couples thermo-électriques identiques (*fig.* 1192). Les courants, produits par ces deux couples, *a*, *a'* (*fig.* 1200), passaient en sens contraire dans un réomètre différentiel *r*. Dans l'un des circuits était interposé le fil à essayer *f*, et dans l'autre, un réostat à fil de platine *cmp*. Ce fil, tendu par un poids *p*, communiquait avec le circuit, par son extrémité *c*, et par un curseur *m* formé d'un morceau de liége pouvant glisser sur le fil de platine et portant une cavité remplie de mercure que traversait ce fil, et dans laquelle plongeait l'extrémité du fil réophore. En déplaçant le curseur, on arrivait, par tâtonnement, à ramener l'aiguille du réomètre au zéro. Cela étant fait, et les deux circuits ne différant que par le fil *f* et par le réostat, on pouvait conclure que le fil *f* produisait la même résistance que la partie *mc* du fil de platine. Si donc l, s, c étaient la longueur, la section et la conductibilité du premier fil, l' s' c' les mêmes quantités pour le fil de platine, on avait, d'après les lois des résistances (1615), $ls'c'=l'sc$, d'où $c : c'=s'l : sl'$, pour le rapport des conductibilités. M. Pouillet a ensuite comparé la conductibilité de son fil de platine à celle du mercure. Le liquide était renfermé dans un tube de verre, dont le diamètre avait été mesuré par des pesées, et dont les extrémités s'engageaient dans de larges vases. Ce système était mis à la place du fil *f*.

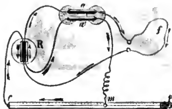


Fig. 1200.

M. Pouillet a déterminé, par cette méthode, la conductibilité d'un certain nombre de métaux, en prenant pour unité celle du mercure. Ce liquide conduit beaucoup moins que les autres métaux, 50 fois moins environ que les meilleurs conducteurs, comme l'or, l'argent, le cuivre. Il a reconnu qu'il suffit de très petites quantités de matières étrangères pour altérer notablement la conductibilité. Par exemple, l'argent a pour conductibilité 51, quand il contient

0,037 d'alliage ; tandis que sa conductibilité n'est plus que 47, 42 et 39 quand il en contient 0,100; 0,143, et 0,253. L'or pur a donné le nombre 39; et celui qui contient 0,049 d'alliage n'a donné que 13. Cette influence des matières étrangères explique, au moins en grande partie, les différences que l'on remarque entre les résultats trouvés par divers physiciens. L'état physique a aussi une influence sensible : le cuivre écroui a donné une conductibilité moindre que le cuivre recuit. Enfin, M. Pouillet a reconnu que l'élévation de température, qui modifie peu la conductibilité du mercure, diminue notablement celle des autres métaux.

1635. Expériences de M. E. Becquerel. — M. E. Becquerel a étudié, en 1846, l'influence de la chaleur sur la conductibilité [1]. La *fig.* 1201 représente l'ensemble de son appareil. P est un couple de Daniell ; le courant qui part du pôle positif se bifurque en *o*, en formant deux courants partiels qui circulent

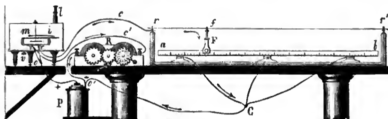


Fig. 1201.

en sens contraire dans un réomètre différentiel *m*. L'un de ces deux courants parcourt ensuite le fil *c'*, traverse le réostat R, et revient à la pile en *o'*. L'autre suit la route *crf*F*a*C*o'*. Le fil à essayer *rfr'* est légèrement tendu entre deux pinces *r*, *r'* ; un curseur en cuivre F, terminé par une pince *f*, et mobile sur une règle divisée *ab*, sert à limiter la partie *rf* du fil, que doit parcourir le courant. La règle *ab* est en cuivre, très épaisse, et communique avec la pile par trois fils qui se réunissent en C, de manière qu'on peut négliger sa résistance au passage du courant. Le réostat permet d'évaluer $0^{mm},2$ sur la longueur de la partie de son fil que parcourt l'électricité. Le réomètre, qui porte 10 tours de chacun des deux fils, est placé sur une tablette fixée à un mur. Un brin de paille *i* adapté à l'aiguille, permet de suivre ses mouvements sur un cadran de 2 décimètres de rayon. Un microscope *l* sert à reconnaître si l'aiguille est exactement au zéro de la division.

Voici maintenant comment on opère : le courant étant établi, et l'aiguille *i* du réomètre ramenée au zéro, on fait glisser le curseur F de manière à augmenter la distance *rf*, d'une quantité connue ; l'aiguille *i* se déplace, et l'on allonge la partie libre du fil du réostat, jusqu'à ce que cette aiguille revienne

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XVII, p. 242.

au zéro. Les longueurs introduites dans les deux circuits présentent alors la même résistance, et l'équation $csl' = c's'l$ donne le rapport $c : c'$ des conductibilités du fil du réostat et du fil d'épreuve rf.

Pour opérer à différentes températures, on enroule le fil d'épreuve autour d'un tube de verre ab (*fig.* 1202) plongé dans une éprouvette AB remplie d'huile, dont un thermomètre t donne la température rendue uniforme au moyen d'un agitateur. Les extrémités du fil, dont la longueur est connue, sont fixées à deux tiges de cuivre à grande section c, c', au moyen desquelles on introduit ce système dans le circuit, à la place du fil rf (*fig.* 1201). L'aiguille du réomètre étant au zéro, on chauffe au bain-marie l'éprouvette AB (*fig.* 1202); l'aiguille i se déplace, et on allonge le fil du réostat jusqu'à ce qu'elle revienne à zéro. L'allongement de ce fil représente l'augmentation de résistance produite par la chaleur, et on la compare à celle du fil froid, que l'on calcule d'après sa conductibilité et ses dimensions connues à l'avance.

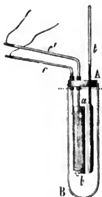


Fig. 1202.

Il résulte d'expériences faites jusqu'à 100°, que la résistance croît proportionnellement à l'augmentation de température. L'impossibilité d'avoir une température uniforme dans toute l'éprouvette AB pendant le refroidissement, explique les petites différences que l'on trouve entre les résultats calculés au moyen de cette loi, et ceux que donne l'expérience directe. — Il résulte de là que, si la résistance d'un fil métallique est r à 0°, et si s est l'augmentation de la résistance pour 1°, la résistance à $t°$, sera $R = r(1 + st)$.

On pourrait être tenté d'attribuer les variations de résistance d'un fil par la chaleur, aux changements de dimensions qu'il éprouve en se dilatant ; mais il est facile de voir que la dilatation diminuerait au contraire la résistance. En effet, soit α le coefficient de dilatation, l la longueur, et d le diamètre du fil à 0° ; sa résistance sera proportionnelle, à la température de 0°, à $l : d^2$, (1615) et à $t°$, à $\frac{l(1+\alpha t)}{d^2(1+\alpha t)^2} = \frac{l}{d^2(1+\alpha t)}$; elle serait donc diminuée dans le rapport de 1 à $1 + \alpha t$.

Voici le tableau des résultats trouvés par M. E. Becquerel. Ces résultats sont rapportés à l'argent écroui, représenté par 100. L'avant-dernière colonne donne le coefficient d'augmentation de la résistance pour une élévation de température de 1°, entre 0° et 100°, et la dernière colonne renferme les conductibilités pour la chaleur, d'après les déterminations de MM. Wiedemann et Franz (II, 811).

SUBSTANCES.	RÉSISTANCES VERS 13°.		CONDUCTIBILITÉS.		COEFFICIENTS d'augmentation de résistance pour 1°.	CONDUCTIBILITÉS pour la chaleur.
	Métal écroui.	Métal recuit.	Métal écroui.	Métal recuit.		
Argent.	107,0	100,00	93,45	100,00	0,004022	100,0
Cuivre	112,25	109,36	89,08	91,44	4097	73,6
Or.	155,31	152,77	64,39	65,46	3397	53,2
Cadmium.....	406,94	»	24,57	»	4040	»
Zinc........	413,84	»	24,16	»	3675	»
Étain..	734,26	»	13,66	»	5615	14,5
Palladium....	714,59	»	13,98	»	»	»
Fer.........	824,89	817,44	12,12	12,25	4729	11,9
Plomb.......	1212,90	»	8,25	»	4549	8,5
Platine......	1243,47	1227,48	8,04	8,15	1861	8,4
Mercure.	5550,15	»	»	1,80	1040	»

On voit que l'ordre des conductibilités pour l'électricité est le même que pour la chaleur ; ce qui vient à l'appui de la similitude établie par M. Ohm entre les modes de propagation des deux agents. Le cuivre est un des meilleurs conducteurs ; c'est pourquoi on l'emploie habituellement pour transmettre l'électricité dynamique. L'aluminium se place auprès des meilleurs conducteurs (33, 76 d'après M. Matthiessen). On voit que l'influence de la chaleur sur la résistance, peu sensible pour le mercure, est très prononcée pour l'étain, le fer, le plomb. On voit aussi que les nombres de la colonne des coefficients ne varient pas régulièrement comme ceux des colonnes précédentes ; la chaleur altère donc les rapports entre les conductibilités. Rappelons enfin l'influence de la résistance que produit la chaleur dans les fils, sur leur échauffement pendant le passage des courants (1527).

Les expériences de M. E. Becquerel n'ont été faites que jusqu'à 100° ; M. Lenz a opéré jusqu'à 200°, et les conclusions de son travail sont généralement d'accord avec celles de M. E. Becquerel. Voici les nombres obtenus par M. Lenz ; la conductibilité du cuivre est représentée par 100.

	Argent,	*cuivre,*	*or*	*étain,*	*laiton,*	*fer,*	*plomb,*	*platine.*
A 0°.	136,25	100	79,79	30,84	29,30	17,74	14,62	14,16
A 100°........	94,45	73	65,20	20,44	21,78	10,87	9,61	10,93
A 200°.......	68,72	54,82	54,49	14,78	21,45	7,00	6,76	9,00

Enfin M. Matthiessen[1] a déterminé la conductibilité de métaux purs, et aussi

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. L, p. 192. et LIV, p. 255.

de métaux *alcalins* et *terreux*. Il les réduisait en fil, en les forçant, par compression, à sortir d'une cavité conique, par un orifice de diamètre convenable. Tantôt l'opération se faisait dans l'huile de naphte, tantôt à l'air et sous l'influence de la chaleur, suivant la nature du métal. En désignant par 100 la conductibilité de l'argent, il a trouvé les résultats qui suivent, à la température de 16 à 20°.

Sodium,	*magnésium,*	*calcium,*	*potassium,*	*lithium,*	*strontium.*
37,43	25,47	22,14	20,85	19,00	6,71

Les conductibilités du *potassium* et du *sodium* diminuent quand la température s'élève. Ces métaux étaient renfermés dans des tubes de verre. Le sodium a présenté une diminution brusque à sa température de fusion, 93°,4; le potassium a manifesté seulement une diminution très rapide, mais pas de saut brusque. M. Matteucci a reconnu que le bismuth fondu conduit mieux qu'à l'état solide. M. Matthiessen a trouvé qu'il en est de même de l'alliage fusible de rose. Nous remarquerons que la structure cristalline de ces deux substances doit augmenter leur résistance à l'état solide; aussi leur conductibilité est-elle faible dans cet état. Celle du bismuth n'est que 1,19, d'après M. Matthiessen.

1636. CONDUCTIBILITÉ DES CORPS NON MÉTALLIQUES. — La difficulté de donner aux solides non métalliques des dimensions déterminées, fait qu'on n'a pu jusqu'à présent mesurer leurs conductibilités. On a seulement reconnu s'ils sont bons, assez bons, peu, très peu conducteurs. MM. Henrici et Hausmann, et M. Wartmann, entr'autres, ont fait beaucoup d'expériences à ce sujet. Les résultats obtenus par ce dernier sont généralement d'accord avec ceux de ses devanciers. Sur 320 espèces minérales qu'il a examinées, il n'en a trouvé que 67 de conductrices [1]. Les minéraux opaques et brillants conduisent généralement le mieux; parmi les cristaux qui n'appartiennent pas au système régulier, il en est qui ne présentent pas la même conductibilité dans les différentes directions. La structure a une très grande influence sur la conductibilité de certains corps. Le carbone en offre un exemple très remarquable; tandis que le diamant est isolant, le graphite conduit bien; sa conductibilité est 0,56 environ d'après M. Matthiessen. Le charbon de bois est conducteur, seulement quand il a été calciné. M. Violette a constaté que les charbons de bois légers, qui servent à la fabrication de la poudre, conduisent mieux que la plombagine artificielle, quand ils ont été préparés à une température de 1500°. Ces résultats doivent être attribués à des différences de structure. Nous avons vu, en effet, que le diamant se transforme en graphite dans l'arc voltaïque. Nous rappellerons enfin que la conductibilité du charbon pour la chaleur est aussi augmentée par la calcination (II,803).

La chaleur, qui diminue la conductibilité des métaux, semble augmenter celle des corps non métalliques. Le sulfure d'argent devient conducteur quand

[1] *Bibliothèque universelle de Genève* (Arch. des sc.), t. XXII, p. 84.

on le chauffe, même faiblement; le fluorure de plomb, avant la chaleur rouge; le bi-iodure de mercure, vers 110°. Le verre chauffé devient conducteur, et d'autant plus qu'on s'approche davantage de la chaleur rouge. M. Buff a trouvé pour sa résistance à 200°, 250°, 300°, 350° et 400°, les nombres 258, 158, 17, 12, 8. L'augmentation de conductibilité est ici liée au passage de l'électricité par électrolyse; en effet, les corps que nous venons de citer se décomposent sous l'influence du courant quand ils sont échauffés, même avant d'approcher du point de liquéfaction, et l'élévation de température favorise de plus en plus cette décomposition.

II. Mesure de la conductibilité des liquides.

1637. Les liquides conduisent beaucoup moins bien l'électricité que les métaux. Les meilleurs conducteurs sont les dissolutions acides et salines, et les sels en fusion; les huiles essentielles sont généralement isolantes. Nous avons exposé (1573) les motifs qui font attribuer la propagation de l'électricité dans les liquides, à la décomposition chimique qui accompagne le passage du courant. C'est pourquoi la mesure des conductibilités des liquides présente des difficultés particulières, à cause des altérations produites par l'électrolyse, et de plus, des résistances au passage de l'électricité, des électrodes dans le liquide, et réciproquement. Les premières recherches suivies sur ce sujet ont été faites, en 1826, par M. Marianini; mais la méthode qu'il employait comportait, à cette époque, de nombreuses causes d'erreur. Nous citerons cependant le résultat suivant : l'eau de mer conduit 100 fois mieux que l'eau distillée; ce que Cavendish avait d'ailleurs reconnu antérieurement.

1638. Expériences de M. Pouillet [1]. — M. Pouillet, en 1837, a commencé par vérifier les lois de la conductibilité, sur des colonnes liquides renfermées dans des tubes de dimensions connues. Il a ensuite comparé la conductibilité du platine à celle d'une dissolution saturée de sulfate de cuivre, à la température de 15°. Le liquide était renfermé dans un tube de 1 mètre de longueur et de $0^m,02$ de diamètre. Le diamètre du fil de platine était de $\frac{144}{1000}$ de millimètre, et sa longueur de 200 mètres; il était tendu en zig-zag sur une planche munie de chevilles sur deux bords opposés. La colonne liquide était introduite dans un circuit dont faisait partie une boussole des tangentes, puis remplacée par une longueur de fil de platine, déterminée par tâtonnement de manière à donner la même déviation, ou à présenter la même résistance que la colonne liquide. En ramenant les longueurs à la même section, M. Pouillet a trouvé que la dissolution saturée de sulfate de cuivre conduit 2 546 680 fois moins que le platine, ou 16 500 000 fois moins que le cuivre, qui conduit 6,5 fois mieux que le platine.

[1] *Comptes-rendus de l'Acad. des sc.*, t. IV, p. 187, et *Élém. de phys.* (1856), t. I, 641.

Pour comparer la conductibilité, représentée par 100, de la dissolution de sulfate de cuivre à celle des autres liquides, M. Pouillet, après avoir observé la déviation quand le courant traversait le tube rempli de cette dissolution, la remplaçait dans le circuit, par un tube vertical A (*fig.* 1203) contenant l'autre liquide, et dans lequel le courant entrait par la tige métallique *tt'*, et sortait par un bouchon en métal fermant le tube A à sa partie inférieure. Il abaissait ou élevait ensuite la tige *t'* dans le liquide, jusqu'à ce qu'il obtînt la même déviation que dans la première expérience. La nature des métaux mis en contact avec le liquide, variait avec la nature de celui-ci. M. Pouillet a trouvé ainsi les nombres 64, 44, 31, pour des dissolutions de sulfate de cuivre étendues de 1, 2, 4 volumes d'eau; 41,7 pour une dissolution saturée de sulfate de zinc, 0,25 et 1,5 pour l'eau distillée et pour l'eau contenant $\frac{1}{20\,000}$ d'acide nitrique.



Fig. 1203.

1639. Expériences de M. E. Becquerel [1]. — Ces expériences ont été faites en suivant la même marche que pour les fils métalliques (1635). L'appareil employé réalise, avec de nombreux perfectionnements, une disposition indiquée par M. Wheatstone dans son Mémoire sur les réostats, au moyen de laquelle on évite l'influence de la résistance qu'éprouve l'électricité en passant d'une substance dans une autre, parce que le courant conserve toujours la même intensité. Deux éprouvettes verticales *ab*, *a'b'* (*fig.* 1204), contenant le liquide à étudier, reçoivent des tubes de verre *o*, *o'*, dont le diamètre a été déterminé avec soin, par des pesées. Ces tubes sont maintenus à une distance de 4 centimètres du fond des éprouvettes, par des bouchons qui les entourent à leur partie supérieure. *e*, *e'* sont des disques en platine soutenus par des fils de platine *ef*, *e'f'* enveloppés de tubes de verre; l'un, *e'f'*, traverse un bouchon dans lequel il peut glisser; l'autre, *ef*, est porté par un bras horizontal que l'on peut abaisser ou élever à volonté, au moyen d'une crémaillère et d'un pignon. On peut évaluer, à moins de $\frac{1}{10}$ de millimètre, la quantité dont on déplace le disque *e*, au moyen d'une échelle gravée sur la crémaillère et d'un vernier. Des lames

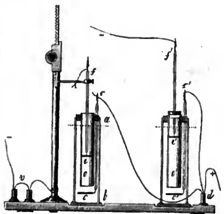


Fig. 1204.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XVII, p. 267.

métalliques *c*, *c'* sont soutenues horizontalement près de l'ouverture inférieure du tube *oo'*, par des fils de même métal entourés d'un tube de verre. L'appareil est introduit dans le circuit d'une pile de 3 ou 4 couples, contenant le réomètre de la *fig.* 1201. Le courant arrive en *d* (*fig.* 1204) et s'y bifurque; une partie suit la route *r'c'e'f'*, en traversant la colonne liquide *c'e'*, et parcourt ensuite l'un des fils du réomètre différentiel; l'autre partie suit la route *drcefv*, et parcourt en sens contraire le second fil, qui vient aboutir, comme le premier, au pôle négatif de la pile. Cela posé, l'aiguille du réomètre étant amenée au zéro par un déplacement convenable de la lame de platine *e*, on remplace l'arc *v* par un fil de platine de dimensions connues, l'aiguille quitte le zéro, et on l'y raméne en abaissant la lame *e*, de maniéro à diminuer la résistance de la colonne liquide *ce*. La résistance du fil introduit en *v* est alors équivalente à celle d'une colonne liquide ayant pour diamètre celui du tube *o*, et pour longueur la quantité dont on a abaissé la lame *e*.

Il est essentiel d'éviter l'influence des altérations du liquide par l'électrolyse. Quand on opére sur une dissolution saline, on fait les lames positives *c*, *c'* avec le métal du sel, de manière qu'elles se comportent comme électrodes solubles et régénèrent le sel. Quand ce métal ne peut être obtenu en lames, ou quand on n'a pas affaire à une dissolution saline, on forme les lames *c*, *c'*, d'un métal oxydable, pour empêcher tout dégagement de gaz. Le sel qui se produit alors reste au bas de l'éprouvette *ab*, et ne modifie pas la conductibilité de la colonne *ce*. Il faut, dans ce cas, employer un courant faible, pour éviter un trop grand dégagement d'hydrogène en *e*, *e'*, et même incliner un peu les lames *e*, *e'* pour en faciliter le départ; malgré cela, l'aiguille du réomètre est toujours un peu agitée.

Voici le tableau des résultats trouvés par M. E. Becquerel :

SUBSTANCES.	DENSITÉS.	TEMPÉRATURES.	POUVOIRS CONDUCTEURS.
Argent pur	»	0°	100 000 000
Eau saturée de sulfate de cuivre	1,1707	9,25	5,42
Id. de chlorure de sodium à 9°,50	»	13,40	31,52
Id. de nitrate de cuivre	1,6008	13,00	8,995
Id. de sulfate de zinc	1,4410	14,40	5,77
250 gr. d'eau, 30 gr. d'iodure de potassium	»	12,50	11,20
220 cent. cubes d'eau, 20cc d'acide sulfurique concentré	»	19,00	88,68
Acide azotique à 36°	»	13,10	93,77
30 gr. de protochlorure d'antimoine, 120cc d'eau et 100cc d'acide chlorhydrique	»	15,00	112,01

On voit que la dissolution qui conduit le mieux, conduit à peu près un million de fois moins que l'argent.

1640. Influence des quantités de sel dissous. — Les sels peuvent se diviser en deux classes : ceux dont la solution présente un point de saturation, et ceux qui, étant déliquescents, se dissolvent en toutes proportions. Les dissolutions des premiers, comme le *sulfate de cuivre*, le *sel marin*, conduisent d'autant mieux l'électricité qu'elles sont plus concentrées. En appelant C leur conductibilité, et q la quantité de sel dissoute dans l'unité de volume, M. E. Becquerel représente la résistante R par la formule empirique :

$$R = \frac{1}{C} = A + \frac{B}{q}. \qquad [1]$$

A et B sont des constantes qui dépendent de la nature du sel et de sa température, et que l'on détermine au moyen de deux valeurs de R ou C correspondantes à deux valeurs de q. Cette formule exprime que les conductibilités et les poids de sel renfermés dans le même volume, forment les abcisses et les ordonnées d'une hyperbole équilatère dont les asymptotes sont parallèles aux axes des coordonnées.

La conductibilité des dissolutions des sels déliquescents, comme le nitrate de cuivre, le sulfate de zinc, va d'abord en augmentant avec le degré de concentration, et finit par atteindre un maximum, à partir duquel elle diminue quand on ajoute du sel; de sorte que certaines dissolutions concentrées, ou trés étendues d'un même sel, peuvent donner les mêmes résultats. Il existe un maximum semblable pour les mélanges d'eau et d'acide sulfurique; car l'eau acidulée conduit mieux que l'eau pure et que l'acide concentré. La formule [1] s'applique aux sels déliquescents, pour les états de concentration inférieurs au maximum de conductibilité. Nous devons dire, cependant, qu'il résulte d'expériences de M. Marié-Davy sur le sulfate de zinc, qu'il y aurait, au moins pour ce sel, deux maximum de conductibilité : l'un quand la dissolution a pour densité 1,0542, l'autre, qui est celui qu'a trouvé M. E. Becquerel, quand elle a la densité 1,2537 [1].

Antérieurement aux recherches que nous venons de citer, M. Matteucci est arrivé à plusieurs résultats remarquables [2]. Il compara les conductibilités d'un certain nombre de sels anhydres à l'état de fusion ignée : le courant d'une pile traversait d'abord un voltamétre, A, puis se bifurquait : un des courants partiels traversait un second voltamètre, a, et l'autre, la substance à étudier. La différence entre les volumes de gaz recueillis dans les deux voltamètres A, a, représentait la quantité d'électricité qui traversait la substance, et, par conséquent, était proportionnelle à sa conductibilité. Aprés avoir constaté qu'il n'y a aucune relation entre la conductibilité à l'état de fusion, et la composition chimique,

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XIX, p. 422.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XV, p. 498.

M. Matteucci compara le pouvoir conducteur d'un certain nombre de sels en fusion, à leur conductibilité en dissolution concentrée. Il trouva que les sels qui, fondus, conduisent mieux que l'eau, conduisent beaucoup moins en dissolution concentrée qu'à l'état de fusion. C'est ce qui a lieu pour les nitrates de potasse et d'argent, les chlorures de sodium et de calcium, l'acétate de plomb : quand le sel dissous était placé dans l'un des courants partiels, à la place du voltamètre, tout le courant passait par le sel en fusion. Ayant ensuite comparé entre elles les dissolutions des mêmes composés, il reconnut que celles qui conduisaient le mieux étaient celles qui contenaient le sel le meilleur conducteur à l'état de fusion. D'où il conclut que le courant est transmis par le corps dissous, et que l'eau ne fait que lui donner l'état liquide nécessaire à l'électrolyse. Des expériences faites avec le nitrate d'argent dissous dans l'eau et dans l'alcool, l'ont conduit à admettre que la conductibilité de la dissolution est la même, quand la distance entre les molécules du nitrate dissous est aussi la même.

Il résulte de ce qui précède, que les sels qui, fondus, conduisent moins bien que l'eau, doivent avoir une conductibilité plus grande à l'état de dissolution qu'à l'état de fusion ; c'est, en effet, ce qui a été constaté sur les protochlorures d'antimoine et d'étain. Le bichlorure d'antimoine et le perchlorure d'étain, qui ne conduisent pas du tout à l'état de fusion, ne devraient pas conduire, et par conséquent ne pas se décomposer, quand ils sontdissous. Aussi M. Matteucci admet-il que leur décomposition n'est qu'un effet secondaire produit par les éléments du dissolvant préalablement décomposé.

Le même physicien a encore reconnu que, si l'on ajoute un nouveau sel à une dissolution saline, sa conductibilité est augmentée comme si le premier sel n'existait pas, pourvu qu'il ne se forme pas de précipitation. Il en résulte que, si l'on mêle plusieurs sels à une dissolution, on augmentera considérablement sa conductibilité. C'est ainsi qu'en ajoutant du chlorure de cuivre, du protochlorure d'étain et du chlorure d'iode à une dissolution de sel marin, on lui donne une conductibilité qui se rapproche de celle des métaux.

1641. Influence de la température. — Pour comparer les conductibilités des liquides à différentes températures, M. E. Becquerel chauffait au bain-marie l'éprouvette *ab* (*fig.* 1204), jusqu'à ce que la température parût fixe. Des expériences faites sur des dissolutions des sulfates de cuivre et de zinc, et sur l'acide nitrique, ont prouvé que la chaleur *augmente* le pouvoir conducteur des liquides, au lieu de le diminuer comme pour les métaux. Cela vient de ce que la chaleur facilite l'électrolyse, à la faveur de laquelle l'électricité se propage dans les liquides. Il suffit d'une différence de 20 à 30° pour doubler leur conductibilité ; à 100°, elle peut être jusqu'à 4 fois plus grande qu'à 0° ; tandis que celle des métaux diminue, entre les mêmes limites, dans des rapports beaucoup plus faibles, dont les extrêmes sont $\frac{10}{11}$ et $\frac{10}{16}$, qui correspondent au mercure et à l'étain.

L'influence de la température sur la résistance des liquides a aussi été étudiée

par M. Hankel [1]. Il employait une méthode analogue à celle de M. E. Becquerel, et il est arrivé aux mêmes conclusions. Il a reconnu, de plus, que : 1° l'augmentation de conductibilité produite par une certaine élévation de température, est d'autant moins prononcée que cette température est d'avance plus élevée; 2° cette augmentation est d'autant plus grande que la dissolution est plus concentrée ; ce qu'il est porté à attribuer à ce que la chaleur augmente la mobilité des molécules d'une manière d'autant plus sensible, que la dissolution, plus concentrée, est d'abord moins fluide. L'acide sulfurique à divers dégrés de concentration est surtout dans ce cas.

1642. DES LOIS DE LA RÉSISTANCE AU PASSAGE. — Quand l'électricité passe d'un métal dans un autre, il se manifeste une résistance attestée par l'échauffement qui se produit au point de jonction (1522). Une résistance analogue s'observe aussi au passage d'un liquide dans un solide ou réciproquement, et nous avons exposé les principaux motifs qui la font attribuer à la *polarisation* des lames métalliques, c'est-à-dire aux dépôts produits par l'électrolyse (1559); de sorte que, dans les cas où il n'y a pas de polarisation, il n'existerait pas de résistance. M. E. Becquerel et M. Marié-Davy ont cherché, chacun de leur côté, les lois de cette résistance [2].

Les expériences de M. E. Becquerel ont été faites avec l'appareil (*fig.* 1204), seulement les lames c, *c'* étaient appliquées contre les extrémités des tubes *oo'*. Une des parties du courant divisé en *d*, passe par le tube *o'* et par le réomètre différentiel ; l'autre partie traverse successivement le tube *o*, un réostat particulier, une boussole des sinus qui donne l'intensité absolue, puis enfin le réomètre différentiel, et retourne à la pile. Le réostat, désigné sous le nom de *banc de résistance*, est formé de deux fils de platine tendus parallélement sur une poutre horizontale ; les bouts placés à une même extrémité sont joints au circuit, et un lourd curseur en cuivre fait communiquer les deux fils par deux points, dont la position est indiquée sur une règle divisée qui sert de guide au curseur ; de manière que si on le recule d'une quantité *a*, le circuit est augmenté d'une longueur de fil égale à $2a$. Pour évaluer la résistance au passage, l'aiguille du réomètre différentiel étant au zéro, on abaisse la lame *e*, et en même temps on déplace le curseur de manière à maintenir l'aiguille au zéro. On obtient ainsi la longueur de fil de platine dont la résistance équivaut à la portion de colonne liquide qu'on a soustraite. On peut conclure de là la résistance de la colonne entière *ee*, telle qu'elle serait s'il n'y avait pas de perte au passage. On mesure ensuite directement la résistance de cette colonne. Pour cela, on abaisse la lame *ec* jusqu'au contact de la lame *c* ; et si la longueur de fil équivalente à la colonne entière est plus grande que celle qui représente la résistance calculée de cette colonne, c'est qu'il y avait une perte au passage, qui n'existe plus quand les lames se touchent, et qui est égale à l'excès

[1] *Bibl. univ. de Genève* (Archives des sciences), t. IV p. 66.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XX, p. 62; t. XIX, 422, et XXII, 257.

de la résistance observée sur la résistance calculée. — M. E. Becquerel a encore opéré en employant, au lieu de l'éprouvette *ab*, une auge dans laquelle plongeaient deux lames verticales, dont l'une pouvait se rapprocher de l'autre au moyen d'une crémaillère horizontale commandée par un pignon denté, et portant une division.

Dans la méthode de M. Marié-Davy, le liquide dans lequel plongent les deux lames, fait partie d'un circuit contenant un réostat. Le courant ayant une intensité déterminée, on supprime le liquide, et l'on ramène le courant à la même intensité, au moyen du réostat, qui donne alors la résistance équivalente à celle du liquide. S'il y a une résistance au passage variable avec l'intensité du courant, on le reconnaît en ce que le résultat donné par le réostat change avec l'intensité première de ce courant.

D'après M. E. Becquerel, quand il n'y a pas polarisation des lames, par exemple quand elles sont formées avec le métal du sel dissous, la résistance au passage est sensiblement nulle. Cependant, M. Marié-Davy l'a toujours trouvée appréciable ; ce qui peut provenir de ce que le sel qui se produit aux dépens de la lame qui reçoit le fluide positif, ne se dissolvant pas aussitôt, il se forme ce que M. Despretz appelle un *empâtement* du métal (1623).

Quand il y a polarisation des lames, la résistance au passage se manifeste nettement ; elle est d'autant plus prononcée que le courant, en persistant plus longtemps, augmente davantage l'épaisseur des dépôts. M. de La Rive a reconnu que la résistance est diminuée quand on chauffe l'électrode négatif, et M. Vorselmann de Heer, quand on l'agite vivement. C'est que l'on fait ainsi disparaître les dépôts. On n'obtient pas les mêmes résultats quand on agit sur l'électrode positif, parce que c'est au pôle négatif que se forment les dépôts les plus abondants. Cette circonstance nous donne l'explication d'un phénomène singulier observé par M. Matteucci : un vase plein d'eau est divisé en deux par une membrane, et l'on verse d'un côté quelques gouttes de chlorure d'iode. Si l'on fait passer un courant à travers le vase, ce courant est 5 ou 6 fois plus intense quand l'électrode négatif plonge dans l'eau pure ; les substances provenant de la décomposition du chlorure d'iode étant alors arrêtées par la membrane, et ne venant pas augmenter la résistance en se déposant au pôle négatif, comme cela a lieu quand il plonge dans l'eau qui contient le chlorure.

La résistance au passage diminue quand l'intensité du courant augmente, mais non proportionnellement, car le produit des deux quantités n'est pas constant. On peut représenter la résistance r, par la formule empirique :

$$r = a + \frac{b}{i} + \frac{c}{i^2} + \dots$$

i étant l'intensité, et a, b, c,... des constantes qu'on détermine dans chaque cas, au moyen de trois couples de valeurs de r et de i. M. Becquerel et M. Marié-Davy ont reconnu qu'il suffit de conserver les trois premiers termes, pour

représenter d'une manière satisfaisante les résultats de leurs expériences ; M. E. Becquerel trouve aussi que, dans quelques cas, on peut se contenter de deux termes, et écrire $r = a + \frac{1}{2} b$.

M. Marié-Davy remarque que la formule de Ohm, $i = \frac{E}{L + r}$, doit être modifiée, si l'on veut tenir compte de la résistance au passage, qui ne peut manquer d'exister dans la pile. La résistance intérieure se compose alors de deux parties, dont une est cette perte au passage ; on a donc

$$r = r_1 + a + \frac{b}{i} - \frac{c}{i^2} = r' + \frac{b}{i} - \frac{c}{i^2}$$

et la formule de la pile devient

$$i = \frac{E}{L + r' + \frac{b}{i} - \frac{c}{i^2}}; \quad \text{d'où} \quad i = \frac{(E - b) + \frac{c}{i}}{L + r'}$$

M. Marié-Davy trouve que cette nouvelle formule reproduit plus exactement les résultats de ses propres expériences, et de celles de MM. Pouillet et Fechner, que la formule plus simple dans laquelle on suppose que la résistance de la pile est indépendante de l'intensité du courant. On voit du reste, que les deux formules diffèrent d'autant moins l'une de l'autre que i est plus grand, c'est-à-dire que le courant est plus intense.

III. De la conductibilité des gaz.

1643. Conductibilité des gaz très chauds. — A la température ordinaire, les gaz sont complétement isolants pour les courants des piles à faible tension, même quand ils sont très raréfiés. Ce n'est que dans les cas des tensions assez fortes pour produire des *décharges* à travers les milieux isolants, que l'électricité peut les franchir en produisant, suivant les cas, l'étincelle, les aigrettes ou l'arc voltaïque. Mais quand les gaz sont à une haute température, ils deviennent conducteurs, même pour les faibles courants. M. Ermann a constaté ce fait sur les flammes ; il a vu l'aiguille du réomètre se dévier dans un circuit fermé au moyen d'une flamme, et c'est à cette occasion qu'il a découvert le fait de l'*unipolarité* (1558).

Le passage des courants à travers la flamme pourrait être attribué aux particules solides ou aux vapeurs qui la composent. Il était donc nécessaire d'expérimenter sur des gaz purs, et en même temps d'étudier les lois de leur conductibilité ; c'est ce qu'a fait M. E. Becquerel[1]. La *fig.* 1205 représente l'appareil dont il a fait usage. Le courant, fourni par un ou plusieurs couples C, circule

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXIX, p. 355.

autour d'un réomètre à 24000 tours, R, passe par un *agomètre* particulier AB, arrive au tube *nn'* dans lequel il traverse le gaz échauffé, et revient à la pile par le fil *si'*, l'arc *a* et le fil *e'x*. Au moyen des quatre godets *e'*, *e*, *i'*, *i*, on peut, en changeant de place les arcs *a*, *a'*, intervertir le sens du courant dans la partie du circuit qui se trouve à leur droite. Il suffit, pour cela, de joindre *ei'*, *e'i*, au lieu de *ei*, *e'i'*. Le tube à gaz *nn'* est en platine, sans soudure ; il traverse un fourneau, et est préservé du contact du charbon, par un tube en terre *pp'*. Ces tubes sont représentés à part et sur une plus grande échelle, en NN', PP'. Le gaz est introduit par un petit tuyau à robinet *r*, et peut sortir par un autre, V, *v'*, qui plonge dans de l'eau ou du mercure. Quand on veut faire varier la pression du gaz, on fait communiquer le tube *v* avec une machine pneumatique. Quand on opère sur l'air, on peut laisser ouvertes les deux extrémités du tube de platine. Pour que l'électricité traverse le gaz qui remplit

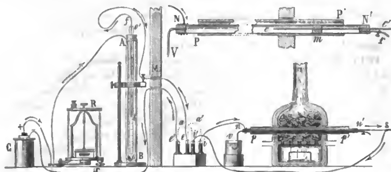


Fig. 1205.

le tube PP', on fait communiquer ce tube, par le fil N, *ni*, avec l'un des pôles de la pile, dont l'autre pôle communique, par le fil *si'*, avec une tige en platine *cc'*, contenant un peu d'iridium pour augmenter sa rigidité. Cette tige est isolée dans le bouchon N', par un petit tube de verre, et est soutenue par un anneau en verre enduit de gomme laque *m*, placé assez loin du fourneau pour que la gomme laque ne soit pas altérée. On pouvait craindre que l'anneau *m* et les bouchons ne devinssent, par la chaleur, assez conducteurs pour que la circulation de l'électricité se fît par leur intermédiaire, au lieu de se faire à travers le gaz. M. E. Becquerel s'est assuré de l'isolement complet de la tige, malgré l'échauffement de l'anneau *m* et du bouchon N', en la remplaçant, dans des expériences faites sur l'air chaud, par un fil de platine passant à travers le tube dont les extrémités étaient ouvertes, et tendu entre deux supports isolants; ou bien en faisant passer le courant entre deux fils de platine tendus parallèlement sans toucher le tube ; les résultats ont été les mêmes qu'avec la tige fixée en *m* et N'. Avec les fils tendus, on a pu remplacer le tube de platine par un tube de porcelaine ou de grès.

L'agomètre AB se compose d'une éprouvette AB remplie de liquide, dans laquelle plonge un tube capillaire *oo'* bien calibré, portant une division en demi-millimètres tracée sur le verre. Un fil de platine *fl* peut s'enfoncer plus ou moins dans ce tube, pour faire varier la longueur *ol* de la colonne liquide que traverse le courant. Ce courant arrive par la lame *o* et le fil A*o*. Un mur M intercepte la chaleur rayonnée par le fourneau.

Voici maintenant comment on opère : on sépare d'abord le tube *nn'* du circuit, en faisant communiquer les godets *e*, *e'* au moyen d'un arc métallique, et l'on donne à l'aiguille du réomètre une déviation déterminée, en enfonçant plus ou moins le fil *fl*. On introduit ensuite dans le circuit, le tube *nn'*, en plaçant les arcs *a*, *a'* comme ils sont dans la figure; la déviation du réomètre diminue, mais en enfonçant le fil *fl*, on la ramène à sa première valeur. Alors la diminution de longueur de la colonne liquide *lo* fait connaître la résistance propre du gaz chaud, augmentée de la résistance au passage entre le métal et le gaz; les résistances des fils de communication et des arcs *a*, *a'* étant négligeables. Il faut avoir soin d'opérer rapidement, pour que la colonne liquide *lo* n'ait pas le temps de s'échauffer par le passage du courant.

1644. Résultats. — 1° Les gaz ne commencent à laisser passer le courant qu'à la chaleur rouge, et leur résistance diminue de plus en plus au-delà de cette limite. Au rouge blanc, ils donnent passage aux courants les plus faibles. Cependant leur résistance est toujours très grande ; celle de l'air, au rouge, est égale à 30000 fois environ celle de l'eau contenant $\frac{1}{10000}$ de sulfate de cuivre.

2° Les divers gaz présentent la même résistance au rouge, puis les différences se prononcent de plus en plus, pour s'atténuer ensuite et disparaître presque entièrement au rouge blanc. La résistance de l'air étant prise pour unité, celle des autres gaz est

Hydrogène,	*hydrogène proto-carboné,*	*oxygène,*	*chlore,*	*azote et son protoxyde,*	*a. carbonique.*
Entre	vers	entre	au plus	à peu près	entre
0,3 et 0,4	0,4	0,4 et 0,7	0,92	1	1,2 et 2.

On voit qu'il n'y a aucun rapport entre ces résistances et les densités.

3° La résistance est plus faible quand le tube de platine sert d'électrode *négatif*, c'est-à-dire quand le fluide positif entre par la plus petite surface ; tandis que la résistance est indépendante du sens du courant, quand il traverse le gaz en passant entre deux fils tendus dans le tube. On remarque un résultat semblable pour les liquides, et on l'attribue à ce que la polarisation, qui est surtout prononcée sur l'électrode négatif, y est d'autant moins sensible en chaque point que cet électrode présente une plus grande surface. Peut-être y a-t-il un effet semblable pour le platine plongé dans les gaz.

4° La résistance diminue avec la pression du gaz. Cependant le courant est toujours complétement intercepté, même dans le vide, au-dessous de la chaleur rouge. Au-delà de cette limite, les différences entre les résistances des divers

gaz à la même température deviennent de plus en plus faibles à mesure que la pression diminue; et quand elle n'est plus que de 2 millimètres, les résistances sont égales. Pour l'air à la température rouge, les pressions étant successivement 760, 137, 40 et 2 millimètres, les résistances sont représentées par les nombres 20,9; 7,1; 4,8; 3,8.

5° Des expériences faites sur l'air ont prouvé que la résistance varie avec l'intensité du courant. Cette variation appartient-elle à la résistance propre du gaz, ou bien affecte-t-elle seulement la perte au passage? M. E. Becquerel penche pour cette dernière opinion, que l'on pourrait contrôler en opérant au moyen de deux fils tendus parallèlement, dont on ferait varier la distance. Quand le courant est fourni par une même pile et qu'on modifie son intensité au moyen du réostat, on trouve que la résistance diminue quand l'intensité augmente, et d'autant plus que la pile possède un plus grand nombre de couples. La résistance dépend aussi, à égalité d'intensité, du nombre des couples; elle augmente en même temps que ce nombre. Par exemple, le réomètre marquant 15°, la résistance de l'air, au rouge, a été 572 pour une pile à auge de 40 couples, et 292 pour une pile de 20 couples.

Si l'on veut se rendre compte des lois qui précèdent, dans le système qui sert à expliquer la propagation de l'électricité, on rencontre de sérieuses difficultés; car, si l'on conçoit bien que la chaleur ait une influence sur la facilité avec laquelle la décomposition du fluide neutre se fait dans chaque molécule, on ne comprend pas comment la raréfaction diminue la résistance des gaz, puisqu'elle réduit le nombre des points matériels par l'intermédiaire desquels se fait la propagation. Il y a donc là un point obscur qui appelle de nouvelles recherches.

§ 4. — COMPARAISON DES FORCES ÉLECTROMOTRICES, ET DES QUANTITÉS D'ÉLECTRICITÉ.

I. Des forces électromotrices des diverses espèces de couples.

1645. La formule de Ohm $i = E : R$ contient la somme E des forces électromotrices du circuit (1618); cette quantité représente l'effort qui tend à vaincre les résistances qu'il renferme. Elle dépend du nombre des couples et de leur nature; mais, comme nous le verrons, elle est indépendante de la grandeur des lames qui les composent, comme cela résulte, du reste, des expériences de M. Kohlrauch (1624) qui l'a trouvée proportionnelle à la tension aux pôles, laquelle est indépendante de la grandeur des couples. Cette tension peut donc servir de définition à la force électromotrice, quelle que soit l'opinion que l'on adopte sur la cause qui engendre l'électricité voltaïque. Plusieurs physiciens ont imaginé des méthodes pour mesurer le terme E, soit pour appliquer la formule qui le contient, soit pour comparer les différents systèmes de couples.

1646. MÉTHODES POUR COMPARER LES FORCES DES COUPLES. — M. Ohm a indiqué

la première méthode pour comparer les forces électromotrices de deux couples : on mesure avec un réomètre les intensités i et i' des courants que donne l'un des couples après qu'on a introduit successivement dans son circuit des longueurs l, l' d'un même fil, pour augmenter la résistance primitive r. On a alors les deux égalités :

$$i=\frac{E}{r+l},\quad i'=\frac{E}{r+l'};\qquad \text{d'où}\quad E=\frac{ii'}{i-i'}(l'-l),$$

en éliminant r. On trouve de même pour l'autre couple, une valeur E', et l'on divise E par E'. Les deux valeurs de E et E' dépendent évidemment de l'instrument avec lequel on mesure i et i' ; mais le rapport $E:E'$ en est complètement indépendant, ainsi que de l'unité choisie pour exprimer i et i'.

Méthode de M. Fechner. — On dispose les deux couples à comparer, dans un même circuit, d'abord de manière que les courants qu'ils produisent marchent dans le même sens, ensuite de manière qu'ils marchent en sens contraire, et l'on mesure, par la méthode des oscillations, les intensités des courants résultants. On admet que ces intensités sont égales à la somme s, puis à la différence d des courants particuliers de chaque couple. On a donc, en représentant par r, r' les résistances individuelles des couples (1620),

$$s=\frac{E+E'}{r+r'},\quad d=\frac{E-E'}{r+r'};\qquad \text{d'où}\quad \frac{E}{E'}=\frac{s+d}{s-d}.$$

Les deux méthodes qui précèdent ne sont applicables avec exactitude qu'aux couples à courant constant ; car, pour les couples variables, indépendamment des changements continuels de la quantité même que l'on veut évaluer, les résistances r et r' varient d'une expérience à l'autre, de sorte que l'on ne peut songer à les éliminer. M. Fechner a employé un autre procédé qui est indépendant des variations de r et r' : on ajoute aux circuits dans lesquels on introduit les couples à comparer, une même résistance très grande R, par rapport à laquelle les résistances des couples peuvent être négligées, et l'on mesure les intensités i et i' ; on a alors :

$$i=\frac{E}{r+R},\ i'=\frac{E'}{r'+R};\quad \text{ou}\quad i=\frac{E}{R},\ i'=\frac{E'}{R};\ \text{d'où}\quad \frac{E}{E'}=\frac{i}{i'},$$

en négligeant r et r' devant R. Cette méthode a été appliquée avec succès par M. Joule, qui prenait la résistance R égale à plus de 300 fois r et r' ; et par M. E. Becquerel, qui la prenait égale à 30000 fois celle d'un couple de Grove, et mesurait i et i' en milligrammes au moyen de la balance électromagnétique décrite plus haut (1614).

Méthode de M. Wheatstone. — M. Weatstone a appliqué son réostat à la détermination du rapport $E':E=n$ entre les forces de deux couples constants[2].

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. VII, p. 87.
[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. X, p. 274.

On commence par faire passer à travers le réostat et un réomètre, le courant du premier couple, et l'on modifie la résistance de manière à obtenir une déviation déterminée, indiquant une certaine intensité i ; on a alors $i = E : r$. On fait ensuite tourner le réostat de manière à obtenir une nouvelle déviation indiquant une autre intensité, et l'on a $i' = \frac{E}{r+l}$. On opère de même avec le second couple, de manière à obtenir successivement les mêmes intensités i, i' ; on a d'abord $i = nE : nr$; car la résistance doit être nr pour que la valeur de i reste la même qu'avec l'autre couple. Ajoutant ensuite une longueur de fil l', de manière à obtenir l'intensité i', on a $i' = \frac{nE}{nr+l'}$. Les deux valeurs de i' étant égales, on a $\frac{E}{r+l} = \frac{nE}{nr+l'}$; et par conséquent $l' = nl$. Le rapport cherché n est donc égal au rapport, donné par le réostat, des longueurs de fil ajoutées successivement avec les deux couples, pour passer de i à i'.

Méthode de M. Pouillet. — Pour comparer la force d'un couple hydro-électrique à celle de son couple thermo-électrique normal (1615), M. Pouillet met dans le circuit, avec le couple, une boussole des sinus et le fil de platine qui lui a servi à comparer la conductibilité des liquides à celle des métaux (1638). Il introduit des portions de ce fil telles que les déviations restent les mêmes quand il opère avec l'un ou l'autre couple. La formule $i = E : R$ montre qu'alors les forces E des couples sont entre elles comme les résistances totales des deux circuits, exprimées en longueur du fil de platine. Les longueurs réduites de la boussole et de chaque couple sont déterminées par la méthode qui avait servi à établir la formule des piles (1623).

Méthode de M. Singer. — Dans cette méthode, on n'a pas besoin de connaître la résistance du couple. On introduit dans le circuit une boussole des tangentes, on obtient une déviation α, et l'on a $\tan \alpha = E : R$; si l'on introduit une résistance additionnelle ρ, on aura $\tan \alpha' = E : (R + \rho)$. Remplaçant R par sa valeur tirée de la première équation, il vient $\tan \alpha' = \frac{E \tan \alpha}{E + \rho \tan \alpha}$; et si l'on suppose $\rho = E$, on a $\tan \alpha' = \frac{\tan \alpha}{1 + \tan \alpha}$. Si donc, on introduit dans le circuit une résistance ρ telle que la déviation soit égale à α' donnée par la dernière égalité, cette résistance représentera la force électromotrice du couple exprimée en longueur de fil du réostat qui a fourni la résistance ρ.

Méthode de M. Jules Regnauld. — Voici le principe de cette méthode, que son auteur nomme *méthode d'opposition* [1]. Quand deux couples égaux sont disposés en ordre inverse dans le même circuit, il n'y a pas de courant, ou plutôt les deux courants en sens contraire s'entre-détruisent. Si l'un des couples est plus fort que l'autre, il se produit un courant dont l'intensité se

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LXIV, p. 453.

calcule au moyen de la différence des forces électromotrices des deux couples. Si donc nous considérons deux couples donnant séparément des courants dont les intensités sont $E : r$, et $E' : r'$; si l'on met ces courants *en opposition* dans le même circuit, l'intensité du courant résultant sera, d'après la formule de Ohm, $i = \frac{E - E'}{r + r'}$. Ce principe, que M. Faraday semble avoir admis implicitement, se trouve vérifié par un grand nombre de ses expériences, et il est facile de voir quelle serait la marche à suivre pour l'établir. L'intensité serait nulle si l'on avait $E = E'$, quels que soient r et r'. Si, au lieu de deux couples, on considérait deux piles, on aurait $I = \frac{nE - n'E'}{R + R'}$, R et R′ étant les résistances totales de ces piles. Si l'on prend pour unité, un couple de l'une des piles, on aura $E' = 1$; et si l'on oppose un seul couple E, à un nombre n' d'unités tel que l'on ait $I = 0$, on aura $E = n'$; c'est-à-dire que le couple considéré équivaut à autant de fois le couple-unité qu'il a fallu en employer

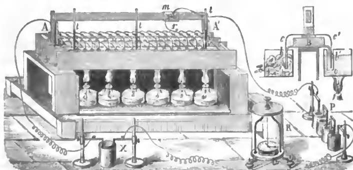


Fig. 1206.

pour contrebalancer le courant qu'il produit. L'*unité* adoptée par M. J. Regnauld est le couple d'une pile thermo-électrique bismuth et cuivre, dont les soudures sont alternativement à 0° et à 100°. Cette pile avait 60 éléments, dont il introduisait dans le circuit un nombre convenable pour annuler le courant du couple à étudier. Mais comme ces 60 unités étaient insuffisantes pour contrebalancer la plupart des couples hydro-électriques, M. J. Regnauld a aussi employé, comme intermédiaire, un couple hydro-électrique d'une constance remarquable, formé de lames de zinc et de cadmium disposées comme celles de la pile de Daniell ; le cadmium plongeant dans du sulfate de cadmium, et le zinc dans une solution de sulfate de zinc saturée à 14°. Ce couple peut être regardé comme une unité d'un ordre supérieur ; quelles que soient ses dimensions, il équivaut à 55 unités thermo-électriques.

La *fig.* 1206 représente l'ensemble de l'appareil de M. J. Regnauld. AA′ est la pile thermo-électrique, X le couple qu'on veut lui comparer, R un

réomètre de 2400 tours, et P, 4 couples zinc-cadmium équivalant chacun à 55 couples thermo-électriques. Le courant du couple X, et ceux des piles AA′ et P circulent en sens contraire. Les couples thermo-électriques doivent être bien identiques. On en voit un en *bcc′b′*, à droite de la figure; il est formé d'un barreau de bismuth *bBb′* coulé dans un tube de verre qui lui sert d'enveloppe. Un fil de cuivre bien recuit *cc′* est soudé par un bout à l'extrémité de la branche *b*, et par l'autre, à la branche opposée du barreau suivant. Le cuivre est joint au bismuth, sans métal intermédiaire : le fil de cuivre, recourbé en crochet, a été enfoncé dans le bismuth, pendant qu'il était tenu en fusion à son extrémité au moyen d'une lampe à alcool. Toutes les soudures du côté *b* s'enfoncent dans de la glace fondante; pour éviter que l'électricité ne passe de l'une à l'autre, chaque couple a été enduit d'une couche isolante, en le plongeant dans de la cire vierge. Les branches du côté *b′* sont enfoncées dans de la cire maintenue en fusion dans une auge *o*, au moyen d'eau en ébullition chauffée par des lampes à alcool. Des thermomètres *t*, *t*, *t* donnent la température de la cire. M. J. Regnauld s'est assuré de l'identité de ces couples, en comparant une série quelconque de 55 d'entre eux, à son couple zinc et cadmium. Pour faire varier le nombre des couples thermo-électriques introduits dans le circuit, il emploie un curseur *m* muni d'un ressort *r*, qui touche un des arcs de cuivre des couples, de manière à mettre en dehors du circuit tous ceux qui sont compris entre *r* et A′.

1647. RÉSULTATS GÉNÉRAUX. — Voici les principaux résultats trouvés par divers physiciens :

I. Grandeur des couples. — M. Wheatstone a reconnu, par sa méthode, que : 1° *la grandeur des éléments n'a pas d'influence sur la force électromotrice*, comme la théorie l'indique. Ce résultat a été principalement constaté sur trois de ses couples à amalgame de zinc (1664) de dimensions très différentes ; il a fallu avec chacun d'eux, 30 tours du réostat pour faire passer le réomètre, de 45° à 40°. 2° La proportion de zinc contenue dans l'amalgame n'a aucune influence ; ce qui pouvait se prévoir d'après la loi qui précède, puisque, changer la quantité de zinc revient à faire varier le nombre de points attaqués. Cette loi a été confirmée par M. J. Regnauld, qui l'a vérifiée aussi avec un couple à amalgame de potassium.

II. Nombre des couples. — *La force électromotrice est proportionnelle au nombre des couples.* Ce principe, admis par M. Ohm, pour établir la formule des piles à plusieurs éléments (1620), a été déduit de l'expérience par MM. Fechner et Pouillet. Ce dernier évalua la force individuelle de 6 couples de Daniell, au moyen de leur résistance et de l'intensité du courant qu'ils produisaient, en fit la somme, et la trouva égale à la force de la pile obtenue en les réunissant en série. M. Wheatstone a aussi vérifié cette loi sur ses couples à amalgame; pour amener le courant, de 45° à 40°, il fallut 30, 61, 91, 120, 150 tours du réostat, quand le courant était fourni par 1, 2, 3, 4, 5 couples. M. Poggendorff a fait une vérification semblable, sur la réunion d'un couple de

Grove avec un couple de Daniell. Nous rappellerons que, si la force électromotrice augmente avec le nombre de couples, la *quantité d'électricité* reste toujours la même, *quand la résistance extérieure est négligeable.* Si, dans une pile, on augmente les dimensions de certains couples, la force électromotrice ne varie pas; mais la résistance de ces couples diminuant, la quantité d'électricité augmente.

III. Diaphragmes. — Il résulte d'expériences de M. J. Regnauld, faites sur des couples de Daniell et des couples zinc-cadmium, et avec des diaphragmes de porcelaine poreuse, terre de pipe, baudruche, bois de poirier, palissandre, ébène, buis, que la nature et l'épaisseur du diaphragme poreux n'ont aucune influence sur la force électromotrice. M. Gaugain avait déjà constaté cette loi sur la pile de Daniell, par la méthode d'opposition. Il a aussi reconnu qu'elle ne s'applique pas aux couples de M. Wheatstone, ce que M. J. Regnauld a confirmé : tandis qu'un couple de Daniell pris pour terme de comparaison l'emportait de 3 unités thermo-électriques sur le couple à amalgame de zinc muni d'un diaphragme en porcelaine, ce dernier surpassait le premier de 26, 44, et 103 unités, quand son diaphragme était en terre de pipe, baudruche ou bois de hêtre. Cette exception est attribuée par M. Gaugain à un dépôt de cuivre, parfaitement visible, qui se fait dans l'intérieur du vase poreux rempli d'amalgame, dans lequel pénètre le sulfate de cuivre. En effet, M. J. Regnauld ayant placé le vase poreux dans un autre de même substance, et rempli l'intervalle avec une solution de sulfate de zinc, la force du couple fut indépendante de la nature du diaphragme.

IV. Influence des dissolutions. — 1° M. Wheatstone a reconnu que la plus grande force électromotrice d'un couple à deux liquides a lieu quand le métal qui prend le fluide positif est plongé dans une solution d'un sel de ce métal; alors la surface du métal ne change pas de nature, car il ne s'y dépose que des particules de même substance. Par exemple, avec un couple à amalgame de zinc et cuivre, il faut 30 tours du réostat pour faire passer le réomètre, de 45° à 40°, quand le cuivre plonge dans une solution de sulfate de cuivre; et il ne faut plus que 20 tours quand ce métal plonge dans l'acide sulfurique dilué. Si le cuivre est remplacé par du platine, il faut 40 tours quand ce dernier métal plonge dans une solution de chlorure de platine, et 27 seulement, dans l'eau acidulée.

2° Le même physicien a conclu d'expériences faites sur des couples à amalgame de zinc, que la force électromotrice est indépendante du genre de sel que contient la solution dans laquelle plonge la lame qui prend le fluide positif, quand ce sel est formé du même métal que la lame. Par exemple, avec une lame de cuivre, les résultats sont les mêmes quand elle plonge dans le sulfate, le sulfate ammoniacal, l'acétate, le perchlorure, ou le nitrate de cuivre, quoique l'intensité du courant change beaucoup de l'une à l'autre solution, à cause de la différence de conductibilité. Le nitrate seul a donné des résultats incertains, sans doute à cause de l'action de l'acide nitrique sur le mercure.

3° M. J. Regnauld a reconnu, avec des couples de Daniell et des couples zinc-cadmium, que les deux lames plongeant dans des solutions de sels du même

métal, la force électromotrice ne dépend pas du degré de concentration de la solution, depuis 1 jusqu'à $\frac{1}{100}$. La limite est un peu moins éloignée pour le métal qui prend le fluide positif, que pour l'autre métal.

4° Le même physicien a déduit d'expériences faites sur des couples zinc-cadmium, zinc-cobalt, zinc-nickel, zinc-aluminium, dont chaque lame plongeait dans une solution saline du même métal, que la force électromotrice varie très peu quand on change le genre du sel. Mais cette loi ne paraît être suffisamment approchée que pour les métaux très éloignés l'un de l'autre dans la série électromotrice.

V. Nature des lames métalliques. — 1° Si l'on prend trois métaux A, B, C dans leur ordre électromoteur, la force de la combinaison AC des extrêmes est égale à la somme des forces des combinaisons AB, BC. Cette loi a été constatée par M. Wheatstone sur les deux séries *potassium*, *zinc*, *cuivre*; *potassium*, *zinc*, *platine*. Voici les nombres de tours du réostat donnant la force des couples :

Amalgame de *potassium*, sulfate de *zinc*, *zinc* amalgamé	29 tours.
Amalgame de *zinc*, sulfate de *cuivre*, *cuivre*	30
Amalgame de *potassium*, sulfate de *cuivre*, *cuivre*	59 tours.
Amalgame de *potassium*, sulfate de *zinc*, *zinc*	29 tours.
Amalgame de *zinc*, chlorure de *platine*, *platine*	40
Amalgame de *potassium*, chlorure de *platine*, *platine*	69 tours.

2° M. Joule a conclu d'un grand nombre de résultats obtenus par la seconde méthode de M. Fechner, que la différence entre les forces électromotrices de deux couples formés de métaux différents recevant le fluide négatif, reste constante quand ces métaux plongent dans la même solution, quel que soit l'autre métal qui complète le couple.

1648. On a fait de nombreuses observations sur les forces électromotrices des différentes combinaisons voltaïques. Les nombres donnés par divers physiciens diffèrent souvent notablement; cela tient à l'imperfection des méthodes, à la polarisation différente des lames, aux impuretés des métaux, aux irrégularités du fil des réostats, à la différente concentration des liquides. Remarquons aussi, avec M. du Moncel, que l'intensité du courant se mesure au moyen de réomètres *multiplicateurs*, dans lesquels l'action du courant sur l'aiguille est répétée plusieurs fois. Il n'est donc pas permis de comparer les forces électromotrices obtenues en se servant de réomètres différents, et c'est en comparant ainsi des nombres trouvés avec différents instruments qu'on est arrivé parfois à des résultats très discordants. M. du Moncel a donné le moyen de passer des nombres donnés avec un réomètre, à ceux qu'aurait donnés un autre instrument

dont la construction est connue [1]. Le couple pris pour terme de comparaison n'est pas non plus toujours le même. Nous avons vu que M. J. Regnauld a pris pour unité, le couple thermo-électrique bismuth-cuivre dont les soudures sont à 0° et 100° ; M. Pouillet avait déjà adopté pour unité son couple normal dont les soudures sont réunies par un fil de cuivre de 20m de long et de 1mm de diamètre, et il avait trouvé son intensité égale à $\frac{1}{94}$ de celle d'un couple à amalgame de zinc (1464). M. Wheatstone avait trouvé sensiblement le même rapport ; mais M. J. Regnauld trouve $\frac{1}{153}$. Il attribue une aussi grande différence à la nature du diaphragme, qui a une grande influence, comme nous venons de le voir, sur le couple à amalgame, et à la présence de soudures pour réunir les deux métaux du couple thermo-électrique. M. J. Regnauld pense que si l'on construit le couple-unité avec toutes les précautions qu'il indique (1646), on lui trouvera toujours la même valeur. Voici, d'après M. E. Becquerel, les valeurs des forces électromotrices des couples les plus usités, rapportés à l'unité thermo-électrique.

Couples de. . . .	Wollaston,	Smée,	Grove,	Bunsen,	Daniell.
Valeurs de E. . .	99	121	326	319	187

Dans les couples suivants dont les forces ont été évaluées par M. J. Regnauld par rapport au couple thermo-électrique, chaque métal plonge dans une dissolution saline dont il forme la base.

Métaux.	Nature des dissolutions salines.	Valeurs de E.
Zinc pur, cadmium	sulfates	55
	chlorures, bromures ou azotates	42
	iodures	45
Zinc amalgamé, cadmium.	sulfates	58
Zinc pur, cobalt	chlorures	114
	azotates	94
Zinc pur, nickel	sulfates	127
	chlorures	109
	azotates	131
Zinc pur, cuivre (Daniell)	sulfates, acétates ou chlorures	174
	azotates	160

1649. Forces électromotrices absolues. — Pour appliquer la formule $i = E : R$, il faudrait connaître la valeur de E, non plus par comparaison à la force électromotrice d'un couple choisi arbitrairement, mais d'une manière absolue, en représentant, dans les formules qui donnent sa valeur, *i* en équivalents d'électricité, ou par le poids d'hydrogène dégagé dans un voltamètre

[1] *Annales télégraphiques*, nos de mars-avril 1861.

en 1 minute ; et les résistances en fonction de l'unité adoptée, soit une colonne de mercure de 1^{mm} de diamètre et de 20^{m} de longueur. M. Poggendorff a imaginé une méthode qu'il nomme *méthode de compensation*, et qui conduit immédiatement à ce résultat :

Considérons deux couples : l'un à courant constant ZP (*fig.* 1207), de Grove, par exemple, l'autre Z'C qui est celui que l'on veut étudier. On réunit ces deux couples par trois fils a, b, c ; le premier c, qui contient un réomètre G et peut être interrompu en β, réunit les deux lames inactives P et C ; le second a réunit les deux lames actives ; Z,Z', et le troisième b, contenant un réostat R réunit les lames Z' et P. Le couple constant ZP fournit un courant qui passe en $\alpha b o' a o$ dans le sens de la flèche, et dont une partie est dérivée en $\alpha c \beta o' a o$. Les intensités i et D de ces courants seront données par les formules [2] du nº 1622, dans lesquelles nous remplacerons L par $b+a$, et l'intervalle de dérivation d par b ; a, b, c étant les longueurs réduites exprimant les résistances du fil a, du fil b et du liquide g, du fil c et du liquide w. L'intensité I dans le circuit $\alpha b o' a o$, quand il n'y a pas de circuit dérivé, étant $I = \frac{E}{a+b}$ d'après la loi de Ohm, ces formules donnent

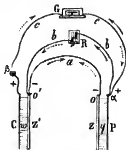


Fig. 1207.

$$i = I \frac{(b+a)c}{(c+b)(b+a)-b^2} = \frac{Ec}{(c+b)a+cb} = \frac{Ec}{S}, \text{ et } D = \frac{Eb}{S}$$

Le couple Z'C fournit aussi un courant suivant $\beta c \alpha o a o'$, dont une partie est dérivée en $\alpha b o'$. Ici l'intervalle de dérivation est $o' o \alpha = a$, et L est égal à $a+c$ et l, à b. Les courants ont les directions des flèches ponctuées ; les intensités i', D' de ceux qui circulent en a et b sont données par les formules [2], celle, I', du courant en c, par la formule [1] (1622), et l'on a

$$i' = I \frac{(a+c)b}{(b+a)(c+a)-a^2} = \frac{E'b}{S}, \quad D' = \frac{E'a}{S}, \quad I' = \frac{E'(b+a)}{S}$$

Les deux courants D et I' qui passent par le réomètre R marchant en sens contraire, on pourra toujours disposer le réostat R de manière que l'aiguille reste au repos, quand le circuit étant d'abord interrompu en β, on le rétablira subitement. On aura alors $D = I'$, ou $\frac{E'}{E} = \frac{b}{b+a}$, qui donne le rapport entre les forces électromotrices des deux couples.

1 *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. VII, 103 et 108.

Remarquons en outre que les deux courants i et D′ qui traversent le fil b sont de même sens, et que leurs intensités réunies peuvent se déduire de la déviation α d'une boussole de sinus, et l'on aura, $k \sin \alpha = i + D' = \frac{Ec + E'a}{S}$ formule dans laquelle k est déterminé, pour la boussole employée, en fonction de l'équivalent d'électricité (1614). Remplaçant E par la valeur $E = E' \frac{b+a}{b}$ en fonction de E′, on tire toutes réductions faites, $E' = bk \sin \alpha$. La quantité b est donnée par le réostat, et s'exprime en colonne de mercure.

Comme on ne ferme le circuit en β que pendant un instant et au moment d'observer, on voit qu'il n'y a pas de polarisation préalable des lames du couple Z′ C, et qu'on obtient sa force *électromotrice absolue*, telle qu'elle est au moment où l'on établit la communication en β.

Force électromotrice du couple-unité. — Nous avons donné plus haut le tableau des forces électromotrices de divers couples en prenant celle du couple thermo-électrique pour unité. Si donc on connaissait la *force électromotrice absolue* de ce dernier, il suffirait de multiplier par cette quantité, les rapports connus, pour avoir la force absolue des autres couples. Or, c'est ce qui peut se faire de la manière suivante : M. Pouillet a trouvé que son couple normal, dont la résistance équivaut à celle de 20^m de fil de cuivre de 1^{mm} de diamètre, donnait un courant dont l'intensité était 2665 fois moindre que celle du courant d'un couple de Daniell, dégageant 2 centimètres cubes d'hydrogéne en 500^s. Comme 1^{gr} d'eau contient $1241^{cc},61$ d'hydrogène, il faudra, pour décomposer 1^{gr} d'eau, ou dégager $\frac{1}{9}$ de gramme d'hydrogéne, $1241^{cc},61 \times \frac{1}{2} 2665 = 1654,445$ fois la quantité d'électricité qui passe dans le couple thermo-électrique en 500^s; et par conséquent $1654,445 \times \frac{500}{60} = 13787$ fois ce qui y passe en 1 minute. Cette dernière quantité d'électricité est donc capable de dégager en 1 minute $\frac{1}{13787}$ de $\frac{1}{9}$ de gramme d'hydrogéne, ou $\frac{1}{124083}$; telle est l'intensité du couple thermo-électrique représentée en poids d'hydrogène dégagé en 1 minute. La résistance du circuit de 20^m est $20^m : sc$; $s = \frac{1}{4}\pi$ étant la section du fil de cuivre, et c sa conductibilité. Cette conductibilité par rapport à celle du mercure prise pour unité, est 49,45 ; on a donc pour la résistance, $20 : (\frac{1}{4}\pi \times 49,45) = 0,515$; et la formule $E = Ri$ donne pour la valeur absolue du couple thermo-électrique $E = 0,515 \times \frac{1}{124083} = 0,000005147$.

1650. Calcul du courant fourni par une pile. — Quand on connaît la force électromotrice qui correspond à une pile, on peut calculer l'intensité i du courant qu'elle fournit, exprimée en équivalent d'électricité ou en poids d'hydrogène dégagé en 1^m, au moyen de la formule $i = \frac{nE}{R + nr}$. La quantité la plus difficile à obtenir est la résistance r de chaque couple ; on peut la calculer approximativement, quand on connaît les dimensions des lames métalliques, et la conductibilité des liquides ; mais le calcul laisse beaucoup d'incertitudes, à cause des effets de la polarisation secondaire des lames.

Au lieu d'employer le calcul, M. Du Moncel mesure directement la résistance des couples, par la méthode suivante indiquée par M. Poggendorff[1]. On fait passer à travers deux des couples égaux à étudier p, p' (*fig.* 1208) le courant d'un autre couple quelconque P. Les couples p, p' sont renversés l'un par rapport à l'autre, de manière à ne pas donner de courant. Le courant de P se bifurque en o et o' ; la partie qui passe par p, p' parcourt aussi un des fils d'un réomètre différentiel G. L'autre partie parcourt l'autre fil de ce réomètre, et passe par un réostat R, que l'on dispose de manière que le réomètre différentiel soit au zéro. Alors le fil du réostat parcouru par le courant présente une résistance égale à la somme des résistances des deux couples p, p'. — Comme ces deux couples ne sont jamais tout à fait égaux, et qu'ils peuvent donner une différence de courants x, on recommence l'expérience en les changeant de place ; si t et t' sont les résistances données par le réostat dans les deux expériences consécutives, et r la résistance de chaque couple, on aura successivement $2r+x=t$, $2r-x=t'$; d'où $r=\frac{1}{4}(t+t')$.

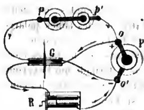


Fig. 1208.

Par cette même méthode, M. du Moncel a confirmé le fait de la variation de résistance de la pile quand la résistance extérieure augmente (1513), en introduisant des longueurs égales de fil, dans les deux circuits de son appareil (*fig.* 1208), au moyen duquel la résistance de la pile n'était pas dissimulée par celle beaucoup plus grande des fils supplémentaires. Par exemple, avec deux couples de Daniell, il a trouvé, en ajoutant 0, 10 et 20 kilomètres de fils dans les deux circuits, les nombres 406^m, 541^m, 584^m, pour représenter les résistances de la pile en longueur de fil du réostat. Un couple de Bunsen a donné les nombres 37^m et 127^m, avec 0 et 10 kilomètres de fil. On voit que l'accroissement de résistance de la pile est notable, quand le circuit extérieur est augmenté dans une aussi grande proportion.

1651. FORCES ÉLECTROMOTRICES ÉLÉMENTAIRES. — Les forces électromotrices que nous avons appris à mesurer, sont dues à diverses actions chimiques, qui séparément produiraient une certaine force électromotrice. Ainsi, dans un couple à deux liquides, il y a à considérer les actions des liquides sur les métaux, celles des liquides entre eux, et celles que produisent les couches déposées par électrolyse sur les lames métalliques. La force électromotrice que l'on mesure n'est donc que l'*effet résultant* des actions électromotrices combinées que nous venons d'énumérer. Il est naturel d'admettre que ces actions élémentaires s'ajoutent les unes aux autres pour produire l'effet résultant, ou se retranchent quand elles donnent des courants de sens contraire. D'après cette loi, en désignant

[1] *Annales télégraphiques*, n° de mars-avril 1861.

par E la force électromotrice résultante, par M_l, $M'_{l'}$, L, M_p, $M'_{p'}$ les forces électromotrices développées par les actions des liquides sur les métaux, des liquides entre eux, et par la polarisation des lames métalliques, on aurait

$$E = M_l - M'_{l'} \pm L - M_p - M'_{p'}$$

en supposant que M soit le métal le plus attaqué. Le signe du terme L dépend du sens du courant produit par l'action mutuelle des deux liquides; les deux derniers termes sont négatifs, car nous avons vu (1461) que les lames polarisées produisent un courant inverse de celui du couple dont elles font partie.

Au moyen de cette loi, on pourra évaluer, dans différents cas, les forces électromotrices élémentaires ; mais il faudra d'abord que la formule qui l'exprime soit vérifiée par l'expérience. C'est ce qui peut être fait en vérifiant les conséquences qu'on peut en déduire. Par exemple, si l'on mesure les forces électromotrices E, E' de deux couples à un seul liquide, *zinc* et *cuivre*, *zinc* et *fer*, par la méthode de M. Poggendorff avec laquelle il n'y a pas polarisation des lames, on aura,

$$E = Z - C, \qquad E' = Z - F; \qquad \text{d'où} \qquad E - E' = F - C$$

en appelant Z, C, F les forces électromotrices élémentaires développées par le liquide au contact du zinc, du cuivre et du fer. Le second nombre de la dernière équation représente la force électromotrice d'un couple formé avec le fer et le cuivre des deux autres, et l'on voit que, si la loi est vraie, cette force doit être égale à $E - E'$. Or, c'est ce que M. Poggendorff a constaté; dans une expérience il a trouvé $E = 13,79$, $E' = 7,40$; d'où $E - E' = 6,39$; et l'expérience directe lui a donné pour le couple *fer* et *cuivre* le nombre 6. La différence entre les résultats est assez petite pour être mise sur le compte des incertitudes des expériences.

1652. Force électromotrice des métaux polarisés. — Les lames polarisées produisent un courant de sens contraire à celui qui a produit l'électrolyse, cause de la polarisation (1557). Plusieurs physiciens ont étudié la force électromotrice correspondante à ce courant secondaire. M. Wheatstone a d'abord reconnu que le courant engendré par les lames de platine polarisées d'un voltamètre à eau acidulée, est presque indépendant du nombre des couples de la pile qui produit l'électrolyse. Pour le prouver, il a évalué en nombre de tours du réostat, au moyen de sa méthode indépendante de la résistance absolue du circuit, la force du courant quand le voltamètre faisait partie du circuit, puis quand il en était séparé. En retranchant les deux résultats l'un de l'autre, il avait l'expression de la force électromotrice due aux lames du voltamètre ; et il a toujours trouvé à peu près la même différence, quel que fût le nombre des couples. Par exemple, avec 3, 4, 5, 6 couples à amalgame de zinc, les différences ont été 69, 70, 71, 71, qui vont à peine en croissant. M. Poggendorff a trouvé que la force du courant de polarisation croît avec l'intensité du courant principal, et d'autant plus que celui-ci est d'avance plus

faible. Mais les différences ne sont pas très grandes : ainsi, l'intensité du courant principal ayant varié de 3 à 76, les valeurs de la force du courant de polarisation ont varié de 25,41 à 28,43.

Dans les expériences de M. Wheatstone, le rapport de la force électromotrice P des lames polarisées, à celle d'un de ses couples, a été P : E=2,33. La force électromotrice d'un couple étant 30, on voit qu'il faudra, pour décomposer l'eau dans le voltamètre, employer trois de ces couples, de manière à constituer une force égale à 90, qui soit capable de vaincre la force 70 que développent les lames de platine polarisées du voltamètre.

La force de polarisation est due aux gaz. — M. Svanberg, qui a trouvé, par la même méthode, à peu près le même rapport P : E=2,20, en se servant d'un couple de Daniell [1], a constaté que la force électromotrice de polarisation n'existe que sur les lames où il se dépose des gaz. MM. Lenz et Saweljev sont arrivés au même résultat, dans un grand travail sur le même sujet [2]. Ils ont aussi employé la méthode de M. Wheatstone. Ils opéraient avec un circuit ne contenant d'abord que la pile, un rhéomètre et le rhéostat; puis, après avoir introduit dans ce circuit le vase contenant les lames polarisées. Ce vase, nommé *cellule à liquide*, est divisé en deux compartiments, par un cylindre en terre poreuse rempli d'un liquide dans lequel plonge une des lames ; l'autre liquide reçoit l'autre lame, et enveloppe le vase poreux. Pour obtenir la force électromotrice due à la polarisation de chaque électrode en particulier, en admettant qu'il ne se développe une semblable force que là où il se dégage un gaz, on emploie d'abord un liquide tel qu'il y ait absence de gaz sur l'une des lames. Prenons pour exemple la décomposition de l'eau : on opère d'abord au moyen de deux lames de platine plongeant dans l'acide nitrique ; l'hydrogène est absorbé par l'acide et ne se dégage pas à l'électrode négatif, et l'on mesure la force de polarisation p due au dépôt de l'oxygène. On répète l'expérience en remplissant la cellule à liquide avec de l'eau acidulée par l'acide sulfurique ; il y a dépôt de gaz sur chaque électrode, et l'on obtient une force de polarisation P due aux deux dépôts réunis. La force électromotrice due à l'hydrogène seul sera donc $p'=P-p$.

MM. Lenz et Saweljev ont trouvé que la force électromotrice que produisent les gaz dépend des lames sur lesquelles ils sont déposés. On ne comprend pas bien, au premier abord, l'influence qu'exerce la substance de ces lames ; mais il faut remarquer que le dépôt ne les recouvrant jamais entièrement, elles se trouvent en contact avec le liquide, par un plus ou moins grand nombre de points ; ce qui permet à la nature chimique du métal d'intervenir, et explique les différences que présentent les résultats trouvés par différents physiciens. — Du reste, la polarisation est bien plus complète quand les dépôts sont faits par électrolyse plutôt que par simple immersion des lames dans les gaz. Par exemple, M. Beetz a trouvé 24, pour la force électromotrice de l'hydrogène

[1] *Bibliothèque universelle de Genève* (Archives des sciences), t. IV, p. 296.

[2] *Ann. de Poggendorff*, LXVII, 497, et *Ann. de ch. et de ph.*, 3e série, t. XX, p. 184.

baignant une lame de platine dans un tube, et M. Poggendorff a trouvé 55, dans le cas du dépôt formé par électrolyse. La présence de l'ozone peut bien, comme le remarque M. de La Rive, être une des causes d'une aussi grande différence. Un même métal peut aussi donner des résultats différents avec le même gaz, suivant l'état de sa surface : ainsi, M. Svanberg a trouvé, dans l'hydrogène, le même nombre 12 pour des lames polies de cuivre et de platine, et à peine 2 pour une lame de cuivre à surface rugueuse. M. Poggendorff a trouvé 55 pour le platine poli, et 40 seulement pour le platine platiné.

Variation de la force de polarisation. — Nous voyons que la force électromotrice de polarisation du gaz dépend de la nature et de l'état des électrodes. Elle dépend aussi, comme nous allons le voir, de leur étendue, de l'intensité du courant, et même du liquide qui entoure les lames, ce qui jette des doutes sur l'exactitude de la méthode de MM. Lenz et Saweljev. M E. Becquerel a donc étudié de nouveau la question [1] en se servant de la balance électromagnétique (1614), avec laquelle on peut employer des courants aussi intenses que l'on veut. Le fil des bobines présentait une résistance équivalente à 330,000 fois celle d'un couple de Grove, ce qui permet de mesurer les forces électromotrices par la méthode de Fechner (1646). Comme la chaleur modifie la résistance de l'appareil, on a opéré à la même température. L'électricité était fournie par des couples de Bunsen, et traversait un appareil à cellules, formé d'un cylindre poreux placé dans un vase de verre, et dont chaque compartiment recevait une lame de platine ou d'or. Les deux compartiments étaient remplis soit d'acide azotique, soit d'eau contenant $\frac{1}{10}$ d'*acide sulfurique*. Quand cet appareil faisait partie du circuit, la force électromotrice allait d'abord en diminuant, et l'on attendait qu'elle fût à peu près constante, pour expérimenter. En retranchant ensuite de la force électromotrice totale, celle de la pile, on obtenait la force des lames polarisées. C'est ainsi qu'ont été obtenus les résultats suivants :

NATURE ET DIMENSIONS DES LAMES.	NOMBRE DES COUPLES.	FORCE ÉLECTROMOTRICE.		
		des COUPLES SEULS.	DU VOLTAMÈTRE à eau acidulée.	DU VOLTAMÈTRE à acide azotique.
Platine, 6^{cm} sur 4^{cm}...	1	98 milligr. 5	73,0	18,5
	2	199,0	96,5	»
	4	394,0	101,0	47,5
Platine, 4^{cm} sur 1^{cm}...	1	98,5	85,0	43,5
	2	199,0	110,0	»
	4	394,0	126,0	53,5
Or, 4^{cm} sur 20^{cm}... ...	1	98,5	92,0	51,0
	2	199,0	131,0	»
	4	394,0	136,5	69,0

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XLVIII, p. 200.

Les nombres de ce tableau expriment des milligrammes. Si l'on veut les exprimer en unités thermo-électriques, il suffit de les multiplier par 3,25; M. E. Becquerel ayant trouvé que 1 milligramme équivaut à 3,25 couples thermo-électriques.

Il résulte de l'inspection du précédent tableau que : 1° la force électromotrice de polarisation, P, augmente avec l'intensité du courant. D'autres expériences, faites avec des fils de platine et d'or de 1^{mm} de diamétre, sur lesquels les gaz se dégageaient, ont conduit à la même conclusion. Les valeurs de P peuvent être représentées par la formule empirique $P = a + bi + ci^2$, dans laquelle i est l'intensité du courant. La valeur de c, — 0,0000875, s'est trouvée tellement petite, qu'on peut la négliger, et se contenter de la formule $P = a + bi$. — 2° La valeur de P diminue quand l'étendue des électrodes augmente ; ce qui pouvait se prévoir, l'intensité du courant qui passe en chaque point diminuant quand la surface augmente. — 3° La valeur de P dépend de la nature du métal et de celle du liquide qui le baigne. — 4° En opérant avec des fils de 1^{mm} de diamétre au lieu de larges lames, on a reconnu que les valeurs de P varient moins quand l'intensité change, et, dans chaque cas, deviennent plus rapidement à peu près constantes ; cela paraît tenir à ce que le gaz qui se dégage agite la couche liquide contiguë, qui est elle-même polarisée ou chargée de gaz. — 5° M. E. Becquerel a reconnu que, dans le vide, la force électromotrice de polarisation semble un peu plus grande que dans l'air, de sorte que la pile semble plus faible. C'est que, dans le vide, l'air dissous dans le liquide se dégage, et ne vient plus diminuer la polarisation de la lame couverte d'hydrogène, en absorbant une partie de ce gaz. M. E. Becquerel a observé le même effet, d'une manière plus marquée, sur un couple zinc-platine et eau acidulée, dont la force s'est trouvée plus faible dans le vide que dans l'air. — Nous avons vu (1462) comment Viard a prouvé, d'une autre manière, l'absorption de l'hydrogène par l'oxygène de l'air, et comment ces résultats expliquent l'affaiblissement de la pile dans le vide, et l'absorption de l'oxygène de l'air par les cuivres d'une pile à un liquide.

Il résulte de toutes les causes de variations des effets de la polarisation, qu'il est impossible de les représenter par des nombres, pour les différents gaz appliqués sur les divers métaux. Cependant M. E. Becquerel a donné les résultats d'expériences faites avec des lames de platine de 10 centimétres carrés plongées dans l'eau acidulée par $\frac{1}{10}$ d'acido sulfurique, ou dans l'acide azotique, en opérant avec 8 à 10 couples de Bunsen. Voici les résultats :

Gaz déposés	*hydrogène dans l'eau,*	*oxygène dans l'eau acidulée,*	*oxygène dans l'acide azotique.*
Forces électromotrices.	$37^{mg},62$	$53^{mg},56$	$9^{mg}.00$

Force de polarisation de divers métaux par l'hydrogène. — M. Ed. Becquerel a aussi déterminé les forces électromotrices de l'hydrogène déposé sur divers métaux, par le moyen suivant : il forme des couples, au moyen de lames de ces métaux associées avec une lame de zinc amalgamé, les plonge

dans de l'eau acidulée au $\frac{1}{10}$, et fait passer à travers le couple, le courant d'une pile de 10 éléments de Bunsen. Il détermine la force électromotrice E du système avant que la polarisation n'ait eu le temps de se produire dans le couple simple, et en retranchant la force de la pile de Bunsen, il a celle, E', du couple simple. Il mesure de nouveau la valeur de E' après que l'hydrogène s'est déposé sur le métal, et il trouve un nombre moindre E". E' — E" représente alors la force du courant inverse produit par la polarisation de la lame. On admet que l'oxygène ne polarise pas le zinc, avec lequel il se combine. Voici les résultats, en milligrammes, *correspondants à des lames de 10 centimètres carrés de surface :*

Métaux associés au zinc amalgamé.		*or,*	*platine,*	*argent,*	*mercure,*	*cuivre,*	*zinc amalgamé,*	*zinc pur.*
Forces électromotrices.	Avant polarisation.	78mg,75	78,75	68,25	57,25	54,75	0	0,25
	Après polarisation.	29,87	35,37	28,50	17,50	24,25	—2	2,00
	De polarisation par l'hydrogène . . .	48,88	43,38	39,75	39,75	27,50	2	— 1,75

On voit combien la polarisation produite par l'hydrogène doit affaiblir le courant des piles à un liquide.

Force de polarisation par divers gaz. — Les différents gaz, et même des corps solides et liquides déposés sur les électrodes produisent des forces de polarisation. M. E. Becquerel a étudié les effets du chlore. L'appareil à cellule, contenant, d'un côté de l'acide chlorhydrique pur, de l'autre de l'acide azotique, est traversé par un courant entrant par l'acide chlorhydrique. Le chlore se dépose sur l'électrode positif, et l'hydrogène est absorbé par l'acide azotique ; de sorte que tout l'effet de la polarisation est dû au chlore. En retranchant de la force électromotrice totale, celle de la pile, on a celle de l'appareil à cellules, composée de l'action de la polarisation et de celle des deux acides agissant l'un sur l'autre. La force électromotrice de l'appareil à cellule avant la polarisation, était égale à 52,5 ; en retranchant de ce dernier nombre les effets de l'appareil à cellule polarisé, on avait la force de polarisation du chlore. On a trouvé ainsi :

Nombre des couples.		1	2	4	6	8	10
Force électromotrice....	de l'appareil seul.	50mg,5	50	46	42	41,5	42,5
	de polarisation par le chlore.. .	2	2,5	6,5	10,5	11	10

On voit que la force de polarisation du chlore est trés faible, et qu'elle augmente avec l'intensité du courant qui traverse les acides.

M. Beetz a comparé les forces électromotrices des divers gaz par une méthode directe, en les substituant successivement à l'oxygéne, dans la pile à gaz (1472) autour d'une des lames de platine. l'autre lame étant entourée d'hydrogéne, et cherchant la force électromotrice par la méthode de M. Poggendorff 1650). Voici quelques résultats trouvés par ce moyen ; l'action de l'hydrogène sur le platine est prise pour terme de comparaison.

chlore,	*oxygène,*	*cyanogène,*	*a. carbonique,*	*air,*	PLATINE.	*gaz oléfiant,*	*a. sulfhydrique.*
31,49	23,98	21,16	20,97	20,5	20,13	18,36	3,05

M. Grove avait trouvé antérieurement le même ordre. M. E. Becquerel a reconnu que la force électromotrice des couples à gaz diminue rapidement. Quand on ouvre le circuit, elle reprend, au bout d'un certain temps, sa première valeur. Nous avons vu comment on explique la production de l'électricité dans les piles à gaz par la polarité électrique moléculaire (1473).

1653. Force électromotrice au contact de deux liquides. — Pour évaluer la force électromotrice élémentaire produite par le contact de deux liquides, M. E. Becquerel sépare ces liquides par un vase poreux, y plonge des lames de platine, et mesure l'intensité du courant produit, au moyen de la balance électro-magnétique. Pour éviter les effets de la polarisation, on emploie de larges lames de platine, et l'on opère rapidement, aussitôt après la fermeture du circuit. Après avoir mis la balance en équilibre, on retire les lames, on les lave, on les fait rougir, puis on recommence l'opération. Comme la balance est déjà à peu près convenablement chargée, il ne faut que quelques instants pour la mettre en équilibre. M. E. Becquerel admet que les lames en contact avec deux liquides différents ne développent pas de courant sensible, et que tout l'effet observé est produit par les deux liquides, ce qui n'est pas évident, car avec la potasse et l'acide azotique les nombres trouvés ont été 44,5 et 60 quand on substituait au platine, l'argent ou l'or, et le charbon. Quoi qu'il en soit, voici les résultats les plus intenses observés, avec indication du signe de l'électricité que prend le liquide intérieur au diaphragme; le liquide extérieur prend l'électricité contraire.

Eau acidulée (9 d'eau, 1 d'acide sulfurique)	sulfate de cuivre saturé (—)	5,50
	eau oxygénée (à 12 vol.) (+)	7,50
	chlorure de platine neutre saturé (+) . . .	7,75
	acide azotique ordinaire (+)	de 19,25 à 21
	acide chromique (eau 1, acide 1) (+) . . .	27,80
	eau chlorée saturée à 14° (+)	37,25
Protosulfate de fer	eau chlorée à 14° (+)	47,00
Acide chlorhydrique.	acide azotique (+)	52,50
Dissolution de potasse (eau 4, potasse 1).		55,50
Persulfure de potassium.		72,50

Il résulte de ce qui précède, que la force des couples à deux liquides ne provient pas seulement des actions exercées sur les métaux, mais aussi de celles des deux liquides. Par exemple, dans un couple de Grove, dont la force électromotrice est, d'après M. E. Becquerel, 98,7 milligrammes, une partie, égale à 20^{mg} environ, est produite par les liquides. Dans un couple à eau acidulée et sulfate de cuivre, dont la force électromotrice est 58^{mg}, les deux liquides fournissent un courant opposé, représenté par 5,50^{mg}, qui détruit une

[1] *Bibliothèque de Genève* (Archives des sciences, 1849), t. XII, p. 285.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XLVIII, p. 242.

partie de l'effet des métaux. Du reste, les forces électromotrices produites par les liquides varient avec leur état de concentration et avec la température, et constituent, comme le remarque M. E. Becquerel, la partie variable des couples à deux liquides.

1654. Forces électromotrices dues à l'action des liquides sur les métaux. — M. E. Becquerel a procédé à la mesure de ces forces électromotrices, par deux méthodes différentes : 1° il forme un couple avec une lame de platine, et le liquide et le métal à étudier, et mesure sa force électromotrice au moyen de la balance électro-magnétique. La lame attaquée n'est pas polarisée, et l'on évite la polarisation de la lame de platine, par le moyen indiqué plus haut (1652). On suppose toujours que le platine ne produit pas de force électromotrice; cependant, avec les substances alcalines, il faut le remplacer par de l'or, parce qu'il se comporte comme s'il était attaqué; — 2° chaque lame est enfoncée dans un vase poreux, et les deux vases poreux sont situés dans un bocal en verre rempli du liquide qui baigne le métal à étudier. Le platine plonge dans de l'acide azotique, qui empêche sa polarisation. Après avoir évalué l'effet produit par l'action des deux liquides l'un sur l'autre, on le retranche de l'effet du couple, et le reste représente la force électromotrice du métal et du liquide étudiés. Ce procédé a donné les mêmes résultats que le premier; en voici le tableau :

MÉTAUX.	FORCES ÉLECTROMOTRICES EN MILLIGRAMMES.							
	Eau distillée.	Eau chlorée.	Eau, 500 SO^3,HO, 1	Eau, 9 SO^3,HO, 1	Eau, 10 HCl, 1	Eau, 4 potasse, 1	Eau, 5 KS^2, 1	Eau, 20 CyK, 1
Amalgame { mercure. 100 / potassium. 1 }	»	165,50	»	137,32	»	»	»	»
Zinc amalgamé..	»	»	81,50	81,75	82,75	81,00	»	77,00
Zinc pur......	31,50	108,75	78,25	79,25	81,00	78,00	13,50	77,00
Cadmium......	»	96,00	61,00	62,75	66,75	55,00	»	»
Plomb.........	21,00	81,50	52,75	52,75	53,25	50,00	3,50	»
Étain.........	»	82,00	51,25	52,25	53,75	67,25	»	17,00
Fer..........	17,50	83,00	50,75	48,75	49,75	50,0 ?	variab. ?	29,00
Aluminium	»	»	45,00	40,75	66,75	85,00	»	»
Nickel........	»	»	34,00	35,75	38,75	24,0 ?	»	»
Cobalt........	»	»	35,00	34,75	37,75	31,0 ?	»	»
Bismuth.......	»	50,00	26,00	29,50	33,00	36,00	»	»
Antimoine.....	»	53,00	26,00	27,75	28,75	48,25	»	»
Cuivre........	10,00	61,00	26,00	27,75	36,75	33,00	9,50	71,00
Argent........	à peine sensible.	55,25	9,50	17,25	27,25	0	7,50	42,00
Mercure.......	»	»	»	25,00	»	»	»	»
Or...........	»	10,00	»	0	»	0	»	48,00
Platine.......	»	0	0	0	»	10,0 ?	»	0

Le métal attaqué prend toujours l'électricité négative, et le dégagement d'électricité est d'autant plus considérable que l'action chimique est plus vive. On voit que l'ordre des métaux, relativement aux forces électromotrices, est le même avec tous les liquides, sauf la dissolution de potasse, avec laquelle l'*aluminium* donne la plus grande force (le potassium étant laissé de côté). — Avec la potasse ; le fer, le nickel, le cobalt donnent des actions qui décroissent rapidement ; c'est qu'ils deviennent passifs (1561). Le zinc et le plomb présentent le même rapport de force électromotrice, $\frac{3}{2}$ environ , avec tous les liquides. La proportion d'acide sulfurique mêlé à l'eau n'a que peu d'influence, car les résultats sont à peu prés les mêmes avec chaque métal, pour les deux dissolutions employées, sauf avec l'argent.

En prenant la différence entre les forces électromotrices de deux métaux dans un même liquide, on aurait la force du couple formé par ces métaux dans le même liquide, avant toute polarisation. Après la polarisation de la lame la moins attaquée, il faudra retrancher l'effet dû au dépôt d'hydrogène, effet qui se trouve dans le tableau ci-dessus (p. 585), pour le cas où la lame a 10 centimètres carrés. Si le couple était à deux liquides, il faudrait aussi tenir compte de l'action des liquides, en recourant au tableau (p. 585). En faisant ce calcul pour certaines associations de métaux dans différents liquides, on pourra trouver des inversions (1452). Nous remarquerons enfin que les lois IV et V énoncées ci-dessus (1647) s'appliquent particulièrement aux actions des liquides sur les métaux.

1655. Relation entre les forces électromotrices et la chaleur dégagée dans les actions chimiques. — Nous avons vu (1530) que la quantité totale de chaleur, Q, produite dans un circuit par le passage de l'électricité pendant le temps θ, est proportionnelle au carré de la force électromotrice E, et à la résistance R du circuit : on a donc $Q = K\frac{E^2}{R}\theta$. Si θ est le temps pendant lequel un équivalent d'électricité est fourni par le couple, on a $i\theta = c^{te}$; remplaçant i par sa valeur $i = E : R$, on tire de là $\theta = cR : E$; valeur qui, portée dans l'expression de Q, donne $Q = CE$, en réunissant les deux constantes en une seule C. Cette formule montre que la *quantité de chaleur dégagée est proportionnelle à la force électromotrice*. M. E. Becquerel a cherché à vérifier cette relation en comparant les nombres qu'il a trouvés pour E, aux quantités Q données par MM. Favre et Silbermann (1065). En représentant par 100 les valeurs de E et de Q correspondantes au zinc, il a trouvé la loi exacte, pour le *zinc* et le *plomb*, dans l'acide sulfurique dilué ou dans l'eau chlorée. Le fer, le cuivre et l'argent ont donné des valeurs de E et de Q très différentes ; mais il est bien difficile de reconnaître quelle est la nature de l'action chimique produite ; par exemple, le cuivre ou l'argent dans l'eau chlorée forment à la fois des protochlorures et des bichlorures, et l'on ne sait pas dans quelle proportion.

MM. Marié-Davy et L. Troost, pour vérifier la même loi, ont calculé, en partant

de la force électromotrice, les quantités de chaleur dégagées par les actions chimiques, et les ont comparées à celles qui ont été trouvées par MM. Favre et Silbermann. Quand cela se pouvait, ils formaient un couple avec les substances qu'ils voulaient faire agir chimiquement, et mesuraient la force électromotrice. Le plus souvent, ils faisaient passer le courant d'une pile de force E, à travers les substances à étudier ; ce courant provoquait des actions chimiques, qui n'auraient pas eu lieu spontanément. Ils mesuraient la force électromotrice E' du système, et prenaient la différence E—E', qui représentait le résultat cherché.

Les deux valeurs de Q, obtenues au moyen des actions d'une douzaine d'acides agissant sur la potasse, la soude, l'ammoniaque et l'oxyde de zinc, se sont toujours trouvées à peu près égales. Les différences étaient de $\frac{1}{26}$ en moyenne ; ce qui s'explique par les incertitudes des expériences, et particulièrement du calcul de la chaleur produite dans les actions chimiques nombreuses qui se succèdent. MM. Marié-Davy et Troost ont conclu de leur travail, qu'on peut légitimement employer les forces électromotrices, pour mesurer les quantités de travail moléculaire et les quantités de chaleur qui en résultent[1].

Conséquences. — M. Favre, en partant de la loi qui précède, a rendu compte de ce fait qu'un seul couple de Grove suffit pour décomposer l'eau, tandis qu'un couple de Wollaston, ou un couple de Daniell ne peuvent le faire. Pour décomposer un équivalent d'eau, il faut que l'action chimique du couple fournisse la quantité de chaleur qui se dégage dans la formation de cet équivalent, soit 34462 calories. Or, dans le couple de Grove, il y a d'abord formation de sulfate de zinc, qui donne 53258 calories pour un équivalent de zinc dissous, et il faut en retrancher la chaleur enlevée par le dégagement de l'oxygène de l'acide azotique réduit. Si cet acide devient AzO^4 ou AzO^3, cette quantité est 6885 ou 13634 ; de sorte que, dans le cas le plus défavorable, le nombre des calories fourni par le couple est encore de 39624 ; quantité plus grande que 34462.

Dans le couple de Wollaston, de la chaleur de sulfatation du zinc, 53258, il faut retrancher celle qui est absorbée par le dégagement de l'hydrogène, ou 34462 ; et dans le couple de Daniell, celle qui est absorbée par la réduction du cuivre, ou 29605; de sorte qu'il ne reste, pour le premier, que 18796 calories, et, pour le second, que 23653.

Force des métaux amalgamés. — Nous avons vu qu'une lame de zinc amalgamé donne, dans un couple, plus d'électricité qu'une lame de zinc pur, ce qui revient à dire que, dans un couple formé de ces deux lames, celle qui est amalgamée prendrait le fluide négatif. M. J. Regnauld explique ce résultat, au moyen des principes précédents. Il remarque que le zinc, *liquide* dans l'amalgame, contient toute la chaleur latente de liquidité, et n'a plus à la perdre quand il se dissout dans l'eau acidulée. Cette chaleur se retrouve donc dans

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LIII, p. 423.

le circuit, et représente un certain travail, qui peut être utilisé soit à décomposer l'eau, soit à faire rougir un fil. La combinaison du zinc avec le mercure a bien dû dégager une certaine quantité de chaleur ; mais cette quantité est moindre que celle qu'absorbe la liquéfaction. En effet, M. J. Regnauld a constaté qu'il y a refroidissement pendant l'amalgamation du zinc, et M. Favre a trouvé directement que la dissolution par l'acide sulfurique, du zinc amalgamé dégage 18796 calories, tandis que celle du zinc pur n'en dégage que 18444. M. Gaugain a reconnu que le cadmium amalgamé est, contrairement au zinc, moins attaqué que le cadmium pur ; c'est que, en s'amalgamant, il dégage de la chaleur, comme l'a constaté M. J. Regnauld, la chaleur latente de fusion étant inférieure à la moitié de celle du zinc. M. J. Regnauld a examiné au même point de vue une dizaine de métaux, amalgamés soit directement, soit par les procédés électro-chimiques, et il a toujours vu les métaux qui, en s'amalgamant dégagent de la chaleur, se comporter comme le cadmium, et ceux qui s'amalgament avec refroidissement, se comporter comme le zinc. M. Gaugain a, du reste, reconnu que l'amalgamation d'un même métal peut augmenter, diminuer ou ne pas modifier sa force électromotrice, suivant la proportion de mercure. Il a aussi reconnu que la proportion de zinc unie au mercure dans un amalgame, a une influence marquée sur la force électromotrice ; de sorte que la loi énoncée plus haut (1647,I) n'est exacte que lorsque la proportion de mercure n'est pas trop grande [1].

II. Comparaison des quantités d'électricité.

1656. Des quantités d'électricité. — La quantité d'électricité fournie par une pile ne dépend pas du nombre de ses couples quand il n'y a pas de résistance extérieure (1465) ; mais elle change d'une combinaison voltaïque à une autre, et pour des couples qui ne diffèrent que par la grandeur des lames métalliques, elle est sensiblement proportionnelle à l'étendue de ces lames (1568).

Les quantités d'électricité nécessaires pour produire les effets chimiques, magnétiques et physiques, étant liées entre elles par des relations simples que nous avons fait connaître, il sera toujours facile de connaître le nombre d'*équivalents* d'électricité passant en 1^s, qui produisent une certaine intensité magnétique donnée par un réomètre déterminé, ou qui transportent une certaine quantité de liquide à travers une cloison poreuse ; car nous avons vu (1541 et 1563) que ces effets sont proportionnels entre eux et au nombre d'équivalents d'électricité. La quantité de chaleur dégagée dans un fil métallique est proportionnelle au carré de l'intensité magnétique (1526), et par conséquent au carré du nombre d'équivalents d'électricité, auquel on pourra la rapporter. Les effets physiologiques ne sont pas aussi faciles à comparer aux autres.

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XLII, p. 430 et LII, 533.

M. Matteucci avait cru reconnaître que l'étendue de la contraction dans des membres de grenouille, ou l'effet physiologique, était proportionnel à l'intensité du courant ; mais l'effet dépend non seulement de la quantité d'électricité lancée à travers les organes, mais surtout de la manière dont varie l'intensité du courant en traversant les nerfs, suivant que l'électricité est introduite plus ou moins brusquement.

Nous allons nous occuper d'évaluer les *quantités* d'électricité dynamique engendrées par un travail chimique donné. Nous avons vu (1649) comment M. Pouillet a calculé que la quantité d'électricité nécessaire pour décomposer un équivalent d'eau, ou de tout autre électrolyte, d'après la loi de Faraday, est égale à 13787 fois la quantité que produit en 1 minute son couple thermo-électrique normal, nombre qui représente aussi la quantité d'électricité dégagée par l'oxydation d'un équivalent de zinc (1567). Mais on ne se fait qu'une idée confuse de la quantité prise par unité, à cause de l'immense rapidité de propagation de l'électricité dynamique. On a donc cherché à comparer l'électricité produite par un travail chimique, à une certaine charge d'*électricité statique*, dont on peut se faire une idée d'après l'intensité de la décharge qu'elle produit.

1657. Comparaison à une quantité d'électricité statique. — Les premières expériences à ce sujet ont été faites par M. Faraday et par Peltier. Ce dernier prenait pour unité d'électricité statique, la quantité capable de dévier de 1°, l'aiguille de son électromètre (1323)[1]. M. Faraday prit une batterie de 15 jarres, ayant 92 pouces carrés de surface armée sur chaque face, la chargea par 30 tours d'une forte machine de Ramsden, et trouva qu'il fallait 800,000 décharges de cette batterie pour décomposer 1 grain anglais d'eau. Le grain valant 0,0647 grammes, et le pouce anglais $2^{cm},53995$, on en conclut que, pour décomposer un équivalent ou 9 milligrammes d'eau, il faudrait la quantité d'électricité accumulée dans une batterie de 197680 mètres carrés de surface armée, chargée au même degré que les 15 jarres ci-dessus. Or, cette quantité d'électricité est fournie par la dissolution de 1 équivalent de zinc. Remarquons que ce résultat n'a rien d'absolu, car la force condensante d'une batterie dépend de l'épaisseur de la lame isolante et même de la forme des armatures.

Plusieurs physiciens ont pris pour terme de comparaison la charge de la *bouteille électrométrique* (1320), qui correspond à une quantité d'électricité dont on peut se faire une idée par la décharge qu'elle donne. Parmi les expériences qui ont été faites au moyen de cette unité, nous citerons celles de M. Buff, en 1853. La bouteille avait 25 décimètres carrés de surface ; elle se déchargeait entre deux boules de 25^{mm} de diamètre, distantes de 1 centimètre. L'armature intérieure communiquait avec une machine électrique, et l'armature extérieure, avec l'une des extrémités du fil d'une boussole des tangentes, dont

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XVII, p. 422.

l'autre extrémité communiquait avec le sol. Quand la machine était mise en mouvement, les décharges se succédaient assez rapidement pour que l'aiguille de la boussole pût prendre une position à peu près constante. On comptait combien il y avait de décharges dans un temps donné. On faisait ensuite passer à travers le voltamètre à eau, un courant voltaïque capable de produire la même déviation, et l'on mesurait la quantité de gaz dégagée pendant le même temps. M. Buff a reconnu ainsi que la quantité d'électricité nécessaire pour décomposer un équivalent d'eau, ou 9^{mg}, était égale à 45 480 charges de sa bouteille électrométrique, ou à la charge d'un condensateur ayant 11 370 mètres carrés de surface armée.

MM. Weber et Kohlrausch ont suivi une marche toute différente pour évaluer les quantités d'électricité[1]. Nous allons essayer de donner une idée générale de la méthode qu'ils ont suivie. Ils ont d'abord déchargé une bouteille de Leyde à travers le fil bien isolé d'un réomètre. Une longue colonne d'eau interposée dans le circuit donnait à la décharge une durée sensible, mais très petite par rapport au temps d'une oscillation de l'aiguille ; de sorte que celle-ci recevait une impulsion indépendante de la durée du passage de l'électricité dans le réomètre, et simplement proportionnelle à la quantité d'électricité. Ils ont ensuite calculé, au moyen de formules mathématiques, le temps très court pendant lequel un courant d'intensité connue devait parcourir le réomètre pour donner la même impulsion à l'aiguille aimantée. Ils ont trouvé ainsi, qu'il passe, pendant l'unité de temps, par chaque section d'un fil conducteur parcouru par le courant pris pour unité d'intensité électro-magnétique, 3504 fois la quantité d'électricité capable de charger la bouteille. Pour définir l'unité d'intensité électro-magnétique, supposons un aimant dont le moment magnétique soit égal à l'unité, placé à une très grande distance, D, d'un conducteur circulaire dont l'aire est égale à l'unité de surface, de manière que son milieu soit sur la perpendiculaire élevée au centre du plan de ce conducteur, auquel son axe est parallèle ; le courant pris pour unité est celui qui, traversant le conducteur circulaire, donne lieu à un couple dont le moment est égal à l'unité divisée par le cube de D.

Les mêmes observateurs ont ensuite rapporté la quantité d'électricité 3504 à une unité d'*électricité statique*, qui est la quantité qui, concentrée en un point et agissant sur une quantité égale du même fluide concentrée en un autre point placé à l'unité de distance, exerce une répulsion égale à l'unité de force. Pour faire cette transformation, ils ont évalué la charge de la bouteille de Leyde, au moyen de cette nouvelle unité. Pour cela, ils ont enlevé à la bouteille une partie de son électricité, au moyen d'une sphère isolée de 159^{mm}, 46 de diamètre qu'ils ont chargée quatre fois de suite en lui faisant toucher l'armature intérieure, et la déchargeant à chaque fois. La tension de l'armature, donnée par un électroscope très sensible, allait en diminuant, et on concluait de la diminution, le

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LXIX, p. 115.

rapport suivant lequel la charge se partageait entre l'armature et la sphère. La charge de celle-ci se déterminait ensuite avec la balance de torsion, par la méthode du plan d'épreuve, et on la rapportait à l'unité de fluide électrique, en connaissant, par des expériences préalables, le moment du couple de torsion correspondant à un angle donné. Au lieu du plan d'épreuve, on employait une petite boule égale à celle de l'aiguille de la balance. Les formules qui donnent le partage de l'électricité entre deux sphères en contact, ont donné le rapport de 1 à 0,0079377 entre la quantité d'électricité que conservait la sphère, et celle que prenait la petite boule; et comme le rapport de la charge de la sphère à celle de l'armature de la bouteille était de 1 à 0,03276, on en concluait le rapport entre la charge de cette dernière et celle de la petite boule. Enfin, on déterminait le nombre d'unités qui correspondait à la charge de cette dernière. La moyenne des expériences a donné 22171000 unités, pour la charge de la bouteille, et, par suite, 155370 millions pour la quantité d'électricité positive ou négative qui passait par chaque section d'un conducteur parcouru par un courant d'intensité égale à l'unité électro-magnétique.

M. Weber prend pour *unité d'intensité électrochimique*, l'intensité du courant qui décompose pendant l'unité de temps 1 milligramme d'eau, ou une quantité équivalente d'un électrolyte quelconque; il trouve que cette unité correspond à 106,66 unités électro-magnétiques. Il faudra donc, pour décomposer 1 milligramme d'eau, 16572 billions d'unités, et 9 fois plus, ou 149148 billions, pour décomposer un équivalent d'eau. Cette dernière quantité, accumulée sur un nuage placé à 1000 mètres de hauteur, et agissant sur une quantité égale de fluide contraire placée à la surface de la terre, exercerait une attraction équivalente à 2 268 000 kilogrammes!

On doit conclure de ce qui précède, que les piles galvaniques dégagent des quantités prodigieuses d'électricité, mais qu'elles ne donnent que de faibles tensions, à moins qu'on n'emploie un très grand nombre de couples; tandis que les machines à frottement, qui peuvent donner de fortes tensions, ne produisent que de très faibles quantités d'électricité. Cependant, certaines machines hydro-électriques peuvent approcher sous ce rapport des piles proprement dites.

CHAPITRE VI.

ÉLECTRO-MAGNÉTISME ET ÉLECTRO-DYNAMIQUE.

Qu'eussent dit Newton, Halley, Dufay, Æpinus, Francklin, Coulomb, si quelqu'un leur avait annoncé qu'un jour viendrait où, à défaut d'aiguille aimantée, des navigateurs pourraient se diriger en observant des courants électriques ?....

(Arago, *Biographie d'Ampère*).

§ 1. — ACTION DES COURANTS SUR LES AIMANTS.

I. Lois des actions électro-magnétiques.

1658. Découverte de l'électro-magnétisme. — Les physiciens n'ont possédé pendant longtemps que des notions vagues sur la corrélation du magnétisme et de l'électricité. On avait bien remarqué quelques effets de la foudre et des décharges des batteries, sur des fils d'acier et sur des aiguilles aimantées ; on avait vu l'aiguille de la boussole s'agiter sous l'influence du feu Saint-Elme ; mais ces faits étaient isolés et sans lien théorique. On essaya plus tard de faire agir les pôles de la pile sur les aimants ; mais comme on avait soin de ne pas fermer le circuit, pour ne pas décharger la pile, parce qu'on ignorait alors ce que c'était que l'électricité dynamique, on n'eut garde de rien obtenir. M. Œrsted, professeur à Copenhague, guidé par les théories de Ritter, qui régnaient alors en Allemagne, et dans lesquelles on admettait que la terre avait des pôles électriques, annonça, en 1807, que l'électricité dans son état le plus latent devait agir sur l'aiguille aimantée ; mais ce ne fut qu'au commencement de 1819 qu'il chercha quelle pourrait être l'action sur cette aiguille, du conflit des deux fluides se neutralisant dans le fil conjonctif d'une pile. Il découvrit alors le fait capital de la déviation de l'aiguille aimantée par le courant.

M. Œrsted expliquait ce phénomène par l'action d'un tourbillon de fluide circulant autour du fil ; explication inadmissible. Aussi trouva-t-il d'abord beaucoup d'incrédules ; d'autant plus que les premiers physiciens qui voulurent répéter l'expérience ne purent réussir, parce qu'ils avaient grand soin de ne pas fermer le circuit. Enfin, M. A de La Rive ayant expérimenté en réunissant les pôles, reproduisit le phénomène, devant Pictet, Prevost, de Saussure,

Arago..... Ce dernier opéra, en 1820, devant l'Académie des sciences de Paris, et dés lors le phénoméne de la déviation de l'aiguille par l'électricité qui circule dans le fil conjonctif, prit rang dans la science. Ampère réunit dans un seul énoncé les différentes circonstances du phénoméne, en disant que *l'aiguille tend à se mettre en croix avec le courant, de manière que son pôle nord soit à la gauche de ce dernier* (1439). Schweigger imagina le multiplicateur ; Colladon fit voir, avec cet instrument, que l'aiguille aimantée peut être déviée par un courant d'électricité due au frottement; on fut bientôt amené à reconnaître les propriétés particulières de l'électricité en mouvement ; *l'électricité dynamique* fut définie et distinguée de l'électricité statique par Ampère, et il se déclara alors un immense mouvement scientifique, pendant lequel les découvertes se succédèrent avec une rapidité inouie. Plusieurs sciences nouvelles, fécondes en applications, prirent naissance : *l'électro-magnétisme*, qui est l'objet de ce chapitre ; *l'électro-chimie* et *l'électro-physiologie*, dont nous avons déjà traité, et dont la création fut la conséquence de l'invention de l'instrument sans lequel les physiciens n'auraient pu étudier les faits dans tous leurs détails ; du réomètre, en un mot, dont nous avons si souvent eu à signaler les nombreuses applications.

1659. LOI DES ACTIONS ÉLECTRO-MAGNÉTIQUES. — L'action d'un courant sur une aiguille aimantée dépend de la quantité d'électricité qui passe, et par conséquent de la grandeur des couples de la pile (1656). Cette action diminue avec la distance; MM. Biot et Savart ont cherché par l'expérience les lois de cette diminution. Pour cela, ils ont suspendu par un fil de cocon, à un support *t* (*fig.* 1209), un barreau d'acier très court et fortement aimanté *a*, rendu astatique par le voisinage d'un aimant A convenablement placé. *cc* est un fil métallique vertical de 3 mètres de longueur, dans lequel passe un courant qu'on peut regarder comme indéfini dans les deux sens. Le petit aimant *a* se place de lui-même perpendiculairement à la plus courte distance de son centre au fil *cc*, dont il peut être plus ou moins éloigné au moyen d'un pignon denté et d'une crémaillère *m* portant une division. Si l'on dérange l'aimant *a* de sa position d'équilibre, il oscille, et le carré du nombre des oscillations accomplies pendant un temps donné est proportionnel à la force électro-magnétique (1211). Pour se mettre à l'abri des erreurs provenant des variations de la pile, MM. Biot et Savart employaient la méthode des observations alternées. Ils ont trouvé ainsi que *l'action du courant varie en raison inverse de la simple distance*, en supposant que cette distance soit assez grande pour que l'action soit la même sur les deux pôles de l'aimant *a* dans toutes ses positions.

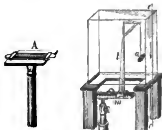


Fig 1209.

Si l'aiguille aimantée n'était pas astatique, on orienterait l'appareil de

manière que l'aiguille en équilibre fût dans le méridien magnétique, et l'on tiendrait compte de l'action terrestre, par la méthode du n° 1211.

Courant angulaire. — Si le courant se compose de deux parties indéfinies *ab*, *ac* (*fig.* 1210) également inclinées par rapport au plan horizontal qui contient l'aimant, l'intensité de l'action qu'il exerce sur ce dernier varie toujours en raison inverse de la distance du point *a* au centre de l'aimant, et de plus cette *intensité est proportionnelle à la tangente trigonométrique de la moitié de l'angle que fait le courant avec le plan horizontal*, c'est-à-dire à tang $\frac{1}{2}\alpha$. Si l'on a $\alpha=90°$, l'intensité est égale à 1, si $\alpha=0$, l'intensité est nulle; ce que l'on conçoit facilement, car les deux parties *ab ac* du courant sont alors appliquées l'une sur l'autre et s'entre-détruisent.

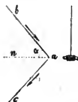


Fig 1210.

1660. Action d'un élément de courant sur un élément magnétique. — Nous ne retrouvons pas ici la loi générale de la variation des effets en raison inverse des carrés des distances; mais ce n'est qu'une apparence, qui tient à ce que l'on observe la somme des actions inégales exercée sur l'aiguille par tous les éléments, de longueur infiniment petite, du fil. Laplace, en parlant des lois expérimentales de MM. Biot et Savart, a trouvé, par le calcul, que l'action *f* d'un élément de courant *mn* (*fig.* 1211), sur une particule magnétique M, à une distance $Mo=r$, est représentée par la formule

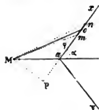


Fig. 1211.

$$f=\frac{Mc\delta \sin\varphi}{r^2}$$

dans laquelle M est l'intensité magnétique au point M, *c* l'intensité du courant, et δ la longueur de l'élément *mn*. Cette formule montre que l'action d'un élément de courant varie : 1° en raison inverse du carré de la distance; 2° proportionnellement au sinus de l'angle φ que fait sa direction avec la ligne qui joint son milieu au point sur lequel il agit. Laplace a trouvé, de plus, que cette action est dirigée suivant la perpendiculaire au plan M*mn* qui passe par le point M et par l'élément considéré. Comme vérification, on peut montrer que cette formule conduit aux lois de MM. Biot et Savart.

En effet, soit *ds* un élément du courant *xay* (*fig.* 1211), et *k* une constante qui dépend de l'intensité du courant et de celle du point magnétique M; on a, d'après la formule, $f=\frac{k\sin\varphi\,.\,ds}{r^2}$. Pour exprimer *ds* et *r* en fonction de la variable φ, abaissons MP perpendiculaire sur *ax*, et considérons successivement les triangles rectangles MP*a* et MP*o*; ils donnent, en représentant par D la distance M*a*, $MP=D\sin\alpha=r\sin\varphi$; d'où $r=\frac{D\sin\alpha}{\sin\varphi}$. Le triangle MP*o* donne

aussi $Po = r \cos \varphi = D \sin \alpha . \cot \varphi$, en remplaçant r par sa valeur. Prenant la différentielle du second membre, il vient $ds = -\frac{D \sin \alpha . d\varphi}{\sin^2 \varphi}$. Portant les valeurs de ds et de r dans l'expression de f, elle devient $f = -\frac{k \sin \varphi . d\varphi}{D \sin \alpha}$. Intégrant le second membre par rapport à φ, depuis $\varphi = 0$, qui correspond à l'élément situé à l'infini sur ax, jusqu'à $\varphi = \alpha$ qui correspond au premier élément en a, et doublant pour avoir l'action des deux parties ax, ay du courant, il vient enfin $\frac{2k(1 - \cos \alpha)}{D \sin \alpha} = \frac{2k}{D} \text{tang } \frac{1}{2} \alpha$, formule qui exprime les lois de MM. Biot et Savart.

1661. Action d'un courant sur une aiguille aimantée pouvant tourner dans un plan perpendiculaire à ce courant. — Au moyen des lois qui précèdent, on peut trouver l'action d'un courant rectiligne indéfini, sur une aiguille aimantée AB (*fig.* 1212) mobile autour de son centre o dans un plan perpendiculaire à ce courant, dont elle est peu éloignée. Soit C l'intersection du courant avec le plan de la figure; désignons par r, r' les distances CA et CB, et par $2l$ la distance AB des pôles magnétiques de l'aiguille. Si nous supposons que le courant marche d'avant en arrière de la figure, il agira par attraction sur le pôle A, qui est à sa gauche, avec une force dirigée *suivant la perpendiculaire à* CA (1660), et égale à $k : r$ (1659), k étant une constante qui dépend de la force magnétique du pôle A et de l'intensité du courant. Cette force peut se décomposer en deux autres : l'une dirigée suivant Ay, qui ne peut faire tourner l'aiguille; l'autre suivant la perpendiculaire à la première, et ayant pour valeur $\frac{k}{r} \cos \alpha$, et pour moment par rapport au point o, $l\frac{k}{r} \cos \alpha$. De même, le moment de la composante parallèle à ox appliquée en B, est $l\frac{k}{r} \cos \alpha'$. Ces moments sont de signe contraire, et leur différence, en vertu de laquelle l'aiguille est sollicitée à tourner dans le sens Ac, est $D = lk\left(\frac{\cos \alpha}{r} - \frac{\cos \alpha'}{r'}\right)$. Si l'on suppose que le courant soit assez éloigné de l'aiguille pour qu'on puisse poser $r = r'$, on voit que, pour que D soit nul, c'est-à-dire pour qu'il y ait équilibre, il faut que $\cos \alpha = \cos \alpha'$; alors l'aiguille est perpendiculaire à la droite Co. Remplaçons les quantités $\cos \alpha$, $\cos \alpha'$, r, r' par leur valeur en fonction des coordonnées x et y du point C par rapport aux axes ox et oy. Les triangles ACa, BCa donnent $r \cos \alpha = l - y$, $r' \cos \alpha' = l + y$; on a, de plus, $r^2 = x^2 + (l - y)^2$, $r'^2 = x^2 + (l + y)^2$. Substituant dans la valeur de D, et réduisant au même dénominateur, il vient

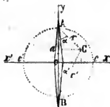


Fig. 1212.

$$D = lk\left(\frac{l - y}{x^2 + (l - y)^2} - \frac{l + y}{x^2 + (l + y)^2}\right) = \frac{2kly}{r^2 r'^2}(l^2 - y^2 - x^2)$$

La valeur de D est nulle, et par conséquent l'aiguille n'est sollicitée d'aucune manière, quand on a $y=0$, ou $x^2+y^2=l^2$. La première équation représente la droite xx' perpendiculaire à l'aiguille ; l'autre représente une circonférence ayant son centre au point o et passant par les points A et B. Il n'y aura donc pas d'action exercée sur l'aiguille, quand la trace C du courant sera sur la droite xx' ou sur la circonférence AcBc'. Quand cette trace sera dans l'intérieur de la circonférence, et dans l'angle Aoc, on aura $y^2+x^2 < l^2$, et y étant positif, il en sera de même de la valeur de D ; l'aiguille tournera donc dans le sens Ac.

Si le point C est situé dans l'angle coB, y est négatif, le mouvement est inverse, et le pôle B se rapproche du courant. L'équilibre est donc instable quand le point C est sur ox. Si ce dernier, toujours dans la circonférence du rayon l, est situé dans l'angle Aoc', le pôle austral se trouve à droite du courant, qui va d'avant en arrière, et la valeur positive de D correspond alors à la répulsion du pôle A par le courant. Le mouvement change de sens quand y est négatif, c'est-à-dire quand la trace du courant est dans l'angle $c'o$B, et l'équilibre est stable quand le point C est sur ox'.

Si le courant passe en dehors de la circonférence AcBc', on a $y^2+x^2 > l^2$, et les mouvements dans les mêmes angles sont inverses de ce qu'ils sont qnand le courant passe dans l'intérieur de la circonférence; par conséquent, l'équilibre est stable sur cx, et instable sur $c'x'$. M. Pouillet a étudié en détail et vérifié par l'expérience tous ces résultats.

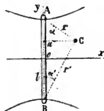


Fig. 1213.

1662. Attraction et répulsion d'un aimant par un courant. — Si l'aiguille aimantée, au lieu d'être mobile autour de son centre, peut se déplacer tout d'une pièce, elle éprouve de la part du courant perpendiculaire, des attractions ou des répulsions qui ont été découvertes par M. Boisgiraud, et qui s'expliquent au moyen des mêmes lois [1]. Considérons d'abord une aiguille aimantée AB (*fig.* 1213) suspendue verticalement à un fil, et soit C la trace d'un courant horizontal marchant d'avant en arrière,, de manière que le pôle nord A de l'aiguille soit à sa gauche. Si ce courant est compris entre deux plans horizontaux passant par les pôles, il y a attraction, et l'aiguille vient s'appuyer contre le fil réophore C. Il y a au contraire répulsion, quand le pôle nord se trouve à droite du courant, par exemple quand ce dernier est transporté du côté opposé de l'aiguille. Si le courant est placé en dehors des plans horizontaux qui passent par les pôles, et à une distance suffisante de ces plans, l'attraction se change en répulsion, et *vice versâ*.

Pour expliquer ces résultats, adoptons les mêmes axes et les mêmes notations que dans la question précédente. L'aiguille est sollicitée par la

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XV, p. 279.

somme $S = \frac{k}{r} \cos \alpha + \frac{k}{r'} \cos \alpha'$ des composantes perpendiculaires à AB, agissant à chacun des pôles. Remplaçant $\cos \alpha$, $\cos \alpha'$, r, r' par leurs valeurs trouvées plus haut (1661), et réduisant au même dénominateur, la valeur de S devient $S = \frac{k(l-y)}{x^2+(l-y)^2} + \frac{k(l+y)}{x^2+(l+y)^2} = \frac{2lk}{r^2r'^2}(x^2-y^2+l^2)$. Cette force est nulle quand on a $x^2-y^2+l^2=0$; équation qui représente une hyperbole équilatère dont les sommets sont en A et B. Entre les branches de cette courbe, on a $x^2-y^2+l^2>0$, et la valeur de S est positive ; c'est-à-dire qu'il y a attraction. En dehors des branches, on a $x^2-y^2+l^2<0$, et l'action est négative, c'est-à-dire qu'elle se change en répulsion. — Si le pôle austral A était à droite du courant, au lieu d'être à gauche, k serait négatif, et les attractions se changeraient en répulsions, et réciproquement.

Supposons maintenant que l'aiguille soit mobile seulement dans le sens de son axe ; elle ne pourra alors obéir qu'aux composantes $\frac{k}{r} \sin \alpha$, $\frac{k}{r'} \sin \alpha'$ dirigées suivant le prolongement de cet axe. Ces composantes agissant en sens contraire, et la première étant la plus grande, leur résultante sera $R = \frac{k}{r} \sin \alpha - \frac{k}{r'} \sin \alpha'$. Remplaçant r, r' par leur valeur ci-dessus, et $\sin \alpha$, $\sin \alpha'$ par $\frac{x}{r}$, $\frac{x}{r'}$, on trouve $R = \frac{4klxy}{r^2r'^2}$. Cette valeur étant positive, l'aiguille marche de B en A ; mais alors la valeur de y diminuant, puisque l'axe ox se rapproche de C, la force va aussi en diminuant ; elle est nulle quand le point C se trouve sur ox, et change de sens quand ce point passe du côté de B ; car alors y, et par conséquent R, deviennent négatifs. Il y a donc équilibre stable quand le courant est à égale distance des deux pôles. Si le pôle nord se trouvait à droite du courant, k serait négatif, l'aiguille serait repoussée de A en B, et l'équilibre, quand le courant est sur ox, serait instable. — Tous ces résultats se vérifient par l'expérience ; pour les observer, on fait flotter l'aiguille sur l'eau, dans le méridien magnétique, et l'on tend le fil réophore perpendiculairement au-dessus.

Au lieu d'un fil rectiligne, on peut employer un fil courbé dans un plan perpendiculaire à l'aiguille ; par exemple, un anneau qui enveloppe une auge étroite remplie d'eau sur laquelle elle flotte ; il est évident que les positions d'équilibre stable ou instable seront les mêmes, et que les mouvements auront lieu dans le même sens, seulement les intensités des composantes seront différentes. On pourra, dans ce cas, faire faire plusieurs tours au fil, comme dans le multiplicateur.

II. Aimantation par les courants.

1663. Action d'un courant sur le magnétisme neutre. — Un courant ayant pour effet de pousser à sa gauche le pôle nord d'un aimant, c'est-à-dire le fluide magnétique austral qu'il contient, et à sa droite le fluide boréal, il était naturel d'essayer s'il pourrait décomposer le magnétisme neutre, en séparant les deux fluides qui le composent. C'est ce que fit Arago, dès le mois de septembre 1820 [1]. Ayant plongé dans la limaille de fer, le fil conjonctif d'une pile, il le retira couvert d'une couche épaisse de limaille, qui se détachait dès qu'il ouvrait le circuit. Dans cette expérience, la limaille ne se dispose pas en houppes hérissées, comme lorsqu'elle s'attache à un aimant, mais elle s'étend en couche unie, dans laquelle les parcelles de fer sont arrangées en séries circulaires, qui entourent le fil réophore comme des anneaux. L'action du courant est nulle sur les limailles des substances non magnétiques; ce qui exclue toute idée d'une action attractive produite par de l'électricité statique. Cette action peut s'exercer à une distance sensible. Arago a pu aimanter de petites aiguilles d'acier trempé en les plaçant en croix sur le fil réophore : le pôle nord formé s'est toujours trouvé à gauche du courant. H. Davy, à peu près à la même époque, arrivait à des résultats semblables.



Fig. 1214.



Fig. 1215.

Aimantation dans des hélices. — Ampère, guidé par des idées théoriques que nous exposerons plus loin, obtint une aimantation plus énergique en faisant passer le courant dans un fil plié en hélice autour de l'aiguille à aimanter. On voit dans la *fig.* 1214 comment on applique cette méthode : *ab*, *a'b'* sont les tiges d'acier, placées dans des tubes de verre, autour desquels le fil réophore s'enroule en hélice. Il y a deux sortes d'hélices : l'*hélice dextrorsum*, D, est celle qui, ayant son axe vertical, s'enroule de droite à gauche en descendant et du côté de l'observateur qui la regarde; l'*hélice sinistrorsum*, S, s'enroule au contraire de gauche à droite en descendant. Ces noms ont été donnés par les botanistes aux hélices que forment les plantes volubiles. Les vis ordinaires sont des hélices *dextrorsum*. Il est facile de voir que, avec cette dernière espèce d'hélice, le pôle *nord* de l'aimant formé, *a'b'*, est à l'extrémité *a'*, par laquelle sort le courant; car c'est là que serait la gauche d'un observateur

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XV, p. 82, 93 et 323.

couché sur une spire, comme est la flèche *o'*, et regardant l'aiguille. On voit de même, que, avec l'hélice *sinistrorsum* S, le pôle *nord a* se trouve à l'extrémité par laquelle entre le courant.

Quand on veut produire une forte aimantation, on prend un fil de cuivre enveloppé de soie, et on l'enroule en hélice autour du tube de verre, de manière que les spires se touchent ; arrivé à l'extrémité du tube, on enroule de nouveau le fil, en revenant, de manière à former une seconde couche de spires. On peut de même former une troisième, une quatrième, couche. Il est vrai que les hélices ainsi disposées sont alternativement dextrorsum et sinistrorsum ; mais comme le courant y entre aussi alternativement par une extrémité et par l'extrémité opposée, le fluide austral est poussé du même côté par chacune d'elles. Remarquons aussi qu'il faut ici, comme pour les réomètres (1621), que la résistance de la pile soit très grande, pour qu'il y ait avantage à augmenter beaucoup le nombre de tours du fil. Malgré tout, on ne peut aimanter que faiblement les tiges d'acier trempé; il manque ici l'ébranlement moléculaire qui fait céder la force coërcitive (1222). Du reste, le maximum d'effet est obtenu instantanément. Nous verrons plus loin (1667) des moyens puissants d'aimantation par les courants, avec lesquels cet ébranlement peut être produit.

Points conséquents. — On peut obtenir à volonté des points conséquents : il suffit pour cela de changer le sens de l'hélice partout où l'on veut en produire. Ainsi, en *a* et *b'* (*fig.* 1215) il y aura des points conséquents, l'hélice étant sinistrorsum de *b* en *a*, dextrorsum de *a* en *b'*, et sinistrorsum de *b'* en *a'*. Les points *b*, *b'* sont des pôles sud, et les points *a*, *a'* des pôles nord.

1664 Aimantation par l'électricité ordinaire. — Arago a reconnu qu'on peut aimanter des aiguilles d'acier au moyen de l'électricité due au frottement. Il faisait passer par étincelles le fluide fourni par une forte machine, à travers l'hélice, dont une extrémité était jointe au sol. M. Ridolfi a réussi au moyen d'un écoulement continu de l'électricité, mais en employant une très forte machine. Si les résultats sont ici bien moins prononcés qu'avec le courant voltaïque, c'est que la *quantité* absolue d'électricité fournie par les plus puissantes machines électriques est très faible (1656). Le moyen le plus efficace pour aimanter avec l'électricité ordinaire, consiste à décharger à travers l'hélice une batterie à grande surface, en faisant en sorte que la décharge ait une durée appréciable. Pour cela, on arme l'une des extrémités du fil de l'hélice, d'une pointe que l'on approche très près de l'armature intérieure de la batterie, dont l'armature extérieure communique avec l'autre extrémité du même fil.

Circonstances qui influent sur l'aimantation par la décharge. — Savary a fait beaucoup d'expériences sur ce sujet[1]. Il a d'abord reconnu que l'intensité de l'aimantation dépend de la charge de la batterie et de la

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXXIV, p. 5.

durée de la décharge. Cette durée ne doit être ni trop courte ni trop longue. Ainsi, quand on décharge une batterie à travers un fil de platine dont la résistance ralentit la décharge, l'aimantation communiquée à des aiguilles égales suspendues au-dessus du fil, dépend de la longueur de ce dernier. Il y a une certaine longueur pour laquelle l'aimantation est *maximum*, et au-dessus de laquelle l'aimantation devient plus faible. La longueur qui correspond au maximum, est du reste d'autant plus grande que le fil est plus gros et meilleur conducteur. Si l'on met à la suite les uns des autres, des fils de dimensions et de nature différentes, l'aimantation de l'aiguille est la même, quelle que soit la partie du circuit près de laquelle elle est placée ; chaque partie étant traversée par le même courant. — Dans toutes ces expériences, la force des aiguilles était mesurée en les faisant osciller sous l'influence de la terre.

Influence de la distance d'un circuit rectiligne. — Des aiguilles en acier, également trempées et de mêmes dimensions, étaient placées perpendiculairement au fil rectiligne, à des hauteurs différentes, et au-dessus de sections assez éloignées les unes des autres pour que ces aiguilles ne pussent s'influencer mutuellement ; elles étaient ainsi soumises à la même décharge d'une batterie. Quand les aiguilles trempées sont assez grosses, ou quand elles ne sont pas trempées, leur degré d'aimantation diminue quand la distance au fil de décharge augmente. Mais quand elles sont fines et trempées, non seulement le degré d'aimantation peut augmenter avec la distance entre certaines limites de position, mais encore le sens de l'aimantation peut être différent dans des aiguilles égales soumises, à différentes distances, à la même décharge. Savary nomme *positive*, l'aimantation dans laquelle le pôle austral se forme à la gauche du courant, et *négative*, celle dans laquelle les pôles sont placés en sens inverse. Cela posé, voici ce qu'il a observé, avec un fil de platine de 2^{mm} de diamètre et de 2 mètres de longueur et des aiguilles d'acier de $0^{mm},25$ de diamètre et 15^{mm} de longueur : à partir du contact, l'aimantation *positive* va en diminuant, elle change de signe à la distance de $2^{mm},5$, va en augmentant jusqu'à la distance de 5 à 6^{mm}, puis diminue jusqu'à 11^{mm}, distance pour laquelle l'aimantation redevient positive ; elle augmente jusqu'à 28^{mm} environ, puis diminue jusqu'à 130^{mm}, qui est la plus grande distance à laquelle on ait observé. Les maximum et les changements de signe sont distribués autrement quand on change les dimensions du fil réophore : plus sa résistance est grande, plus les maximum s'en trouvent rapprochés, et moins il y a de changements de signes. Ainsi, avec un fil de platine de $0^{mm}125$ de diamètre, il n'y a plus de changement de signe, et l'aiguille est aimantée à saturation à la distance de 11^{mm}. Au contraire, avec un fil de 2^{mm} de diamètre n'ayant que 1 mètre de long, il y a jusqu'à quatre changements de signe jusqu'à la distance de 130^{mm}. C'est que, plus la résistance est grande, plus la décharge se rapproche d'un courant continu et régulier. — Les faits qui précèdent expliquent pourquoi les aiguilles de plusieurs boussoles peuvent avoir leurs pôles renversés ou non, après un coup de foudre, suivant leur distance au point foudroyé.

Expériences avec les hélices. — Savary a aussi expérimenté avec des hélices. En faisant varier l'intensité de la décharge, il a obtenu des résultats semblables à ceux qu'il avait observés en changeant la distance; ce qui semble prouver que ces derniers étaient dus à la diminution d'action qui résulte de l'éloignement. Ainsi, ayant placé dans un tube de bois enveloppé d'une hélice, plusieurs aiguilles bien trempées, il obtint jusqu'à six changements de signe en employant des charges successivement croissantes. En augmentant la résistance du circuit par l'allongement du fil, sans rien changer à l'hélice, on finit par n'avoir plus de modifications dans le sens, mais seulement dans l'intensité de l'aimantation. Une hélice formée d'un fil d'argent de $0^{mm},025$ de diamètre, ne donne plus de renversements de pôles quand on fait varier la charge. Enfin, les changements de signe sont indépendants de la longueur des aiguilles d'acier; mais le degré d'aimantation en dépend.

Influence des dimensions de l'hélice. — Arago avait trouvé que : 1° des aiguilles égales s'aimantent également dans une même hélice, quelle que soit la place qu'elles y occupent, quand elles ne sont pas trop près des extrémités; 2° l'aimantation est la même dans deux hélices de diamètre différent, pourvu qu'elles soient assez longues, et que le pas soit le même et assez petit. Quand le pas est assez grand, de 3^{mm} par exemple, l'aimantation est un peu plus forte quand le diamètre est plus petit. Savary a retrouvé ces résultats; il a constaté, de plus, que deux hélices superposées produisent sensiblement le même effet qu'une seule hélice de même longueur et d'un pas moitié moindre; mais l'intensité magnétique des aiguilles est loin d'être double de ce qu'elle serait avec l'hélice simple; le rapport change même notablement avec l'intensité de la décharge.

Influence des conducteurs interposés. — Arago avait remarqué que l'interposition des lames de substances peu conductrices ne modifie pas l'aimantation des aiguilles d'acier. La découverte du magnétisme de rotation, dont nous parlerons plus loin, lui fit soupçonner que les corps conducteurs devaient au contraire modifier l'action de l'électricité. En effet, Savary, ayant placé dans la même hélice, deux aiguilles dont une était enveloppée d'un cylindre épais de cuivre, vit que l'effet de la décharge était nul sur cette dernière. Il diminua alors peu à peu l'épaisseur du cylindre de cuivre, et l'aimantation se manifesta, et de plus en plus; elle atteignit, pour une certaine épaisseur, le même degré que dans l'aiguille non enveloppée, le dépassa ensuite, atteignit un maximum, puis se rapprocha de nouveau, à mesure que l'épaisseur diminuait encore, du degré d'aimantation de l'aiguille nue. L'épaisseur qui correspond à l'aimantation égale des deux aiguilles croît avec l'intensité de la décharge. Enfin, l'enveloppe change quelquefois le sens de l'aimantation. — Pour faire varier facilement l'épaisseur, Savary employait des lames d'étain roulées autour des aiguilles, après s'être assuré que l'effet est le même, à égalité d'épaisseur, qu'avec un cylindre d'étain massif. Du reste, les lames peuvent être séparées ou non par des substances isolantes, mais il faut qu'elles soient continues : une

couche de limaille n'a plus d'action. Le mercure produit le même effet que les autres métaux, quoique d'une manière moins prononcée. De deux tubes, celui qui a le plus grand diamètre exerce le plus d'influence quand l'épaisseur est la même. Quand le diamètre est le même, c'est le tube le plus court qui a le plus d'action, pourvu que sa longueur dépasse toujours celle de l'aiguille.

M. Savary a encore opéré au moyen de courants rectilignes, séparés des aiguilles par de larges plaques métalliques : tandis qu'une même plaque affaiblit beaucoup l'aimantation avec de faibles décharges, elle l'augmente pour des décharges plus fortes. Il en résulte que des plaques, minces et épaisses, produisent des effets contraires avec la même décharge, et qu'il y a une épaisseur pour laquelle l'effet est nul. Quand la plaque est derrière l'aiguille par rapport au courant, son effet est tout opposé ; elle augmente l'aimantation pour les très faibles décharges, d'autant plus qu'elle est plus épaisse, et il y a telle décharge pour laquelle une plaque épaisse l'augmente, et une plaque mince la diminue. Pour des décharges plus fortes, l'une et l'autre l'affaiblissent, la dernière surtout, et elle finit par donner aux aiguilles une aimantation négative. Les divers métaux agissent à des degrés différents sous la même épaisseur, mais les rapports entre leurs actions, non seulement changent, mais encore peuvent être intervertis quand l'intensité de la décharge varie. Nous verrons plus tard que quelques-uns de ces résultats se rattachent à la théorie du magnétisme en mouvement ; mais il en est d'autres, comme le changement de signe de l'aimantation quand la distance ou l'intensité de la décharge varient, qui n'ont pas encore été complètement expliqués.

1665. Circonstances qui influent sur l'aimantation par les courants continus. — Savary a répété avec les courants continus, la plupart des expériences qu'il avait faites au moyen des décharges, mais les variations d'intensité des piles alors connues rendaient les résultats incertains. Néanmoins, il a pu obtenir, quoique d'une manière beaucoup moins nette, les principaux résultats que les décharges lui avaient donnés, même les changements de signe de l'aimantation quand la distance augmente Du reste, les effets des courants se rapprochent d'autant plus de ceux que donne la décharge, que la pile est composée d'un plus grand nombre de couples.

M. Abria a fait un grand travail sur le même sujet, au moyen de piles à courant constant[1]. Les aiguilles à aimanter étaient placées dans des hélices, leur aimantation était mesurée par le nombre d'oscillations accomplies sous l'influence de la terre, et l'intensité du courant était donnée par une boussole des sinus. Voici les résultats trouvés par cette méthode :

1° Comme l'avait découvert Savary, l'effet du courant se produit instantanément; mais si l'on retire et si l'on introduit plusieurs fois l'aiguille dans l'hélice, l'aimantation s'accroît ; ce qui semble indiquer qu'elle se produit au moment où l'action commence ou au moment où elle cesse. Du reste, l'aimantation est la

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. I, p. 385.

même, quand elle est produite d'une seule fois, ou en plusieurs fois au moyen de courants successifs croissant graduellement.

2° Si l'aiguille n'est enfoncée qu'en partie dans l'hélice, l'aimantation ne dépasse que de très peu la partie plongée, et le pôle qui se trouve à la limite de cette dernière recule à mesure que l'aiguille pénètre davantage dans l'hélice.

3° La trempe a une grande influence sur le degré d'aimantation; M. Abria a eu soin d'opérer toujours sur des aiguilles également trempées.

4° La force magnétique croît avec l'intensité du courant, et d'autant plus rapidement que le rapport entre la longueur et le diamètre de l'aiguille est plus grand. D'abord, la force magnétique croît proportionnellement à l'intensité du courant; puis, quand la longueur augmente par rapport au diamètre, elle finit par croître proportionnellement au carré de cette force.

5° La longueur de l'hélice n'a pas d'influence sur le degré d'aimantation, quand le pas reste le même et que l'aiguille ne la dépasse pas ou ne la dépasse que très peu. Les deux hélices que l'on comparait étaient placées l'une à la suite de l'autre dans le même circuit. — Deux hélices de diamètre différent produisent aussi le même effet, quand elles ne sont pas trop courtes. Dans le cas contraire, la plus étroite produit la plus forte aimantation. — Quand deux hélices de mêmes dimensions ont un pas différent, et que le courant est assez intense, les nombres d'oscillations des aiguilles aimantées par leur influence, sont en raison inverse des pas; mais si le courant est faible, l'intensité magnétique développée dans l'hélice dont les spires sont le moins serrées est plus faible que la loi ne l'indique. — Enfin, les enveloppes métalliques n'ont pas, avec les courants continus, l'influence qu'elles ont dans l'aimantation par la décharge.

III. Des électro-aimants.

1066. Electro-aimant. — Si l'on introduit un barreau de fer doux dans une hélice, il s'aimante pendant le passage du courant, avec d'autant plus de facilité qu'il n'y a pas ici de force coërcitive à vaincre. Mais le magnétisme disparaît aussitôt que le courant est interrompu; c'est pourquoi l'appareil se nomme *électro-aimant* ou *électro-magnet*. L'hélice se forme avec un fil de cuivre enveloppé de soie, auquel on fait faire un grand nombre de tours autour du barreau de fer doux. C'est ce qui constitue l'*hélice magnétisante*. Quand le barreau est plus long que l'hélice, les pôles sont situés dans les tranches de fer qui se trouvent immédiatement au-delà des extrémités de celle-ci; l'aimantation s'étend ensuite au-dehors, assez loin de ces pôles; elle est la plus prononcée du côté où le barreau dépasse le plus l'extrémité de l'hélice. Souvent, le morceau de fer est recourbé en fer à cheval, et le fil est enroulé autour des deux branches, de manière que l'hélice soit dextrorsum sur l'une d'elles, et sinistrorsum sur l'autre; afin que le courant, qui entre par le bas dans la première et par le haut

dans la seconde, pousse le fluide austral vers la même extrémité, ou que les deux hélices soient la continuation l'une de l'autre quand le fer est supposé redressé.

Le premier électro-aimant puissant a été construit par M. Pouillet. Un de ces appareils, porté par un fort châssis en bois, est représenté dans la *fig.* 1216. A est le barreau de fer doux, dont les branches verticales sont entourées par les deux parties de l'hélice magnétisante. c est un portant en fer doux, auquel sont suspendues par un crochet, des tringles de fer soutenant, à une petite distance du sol, une longue planche IT, sur laquelle on peut placer des poids ou faire monter plusieurs personnes pendant le passage du courant. Si l'on enlève le portant et qu'on présente aux pôles une assiette remplie de clous, on les voit obéir à distance à l'action magnétique, et rester suspendus les uns aux autres en formant une longue traînée qui représente, sur une grande échelle, ces houppes de limaille que les aimants ordinaires retiennent à leur surface. Au lieu de portant, on peut opposer aux pôles de l'électro-aimant, les pôles *de nom contraire* d'un second électro-aimant ; alors la puissance de l'appareil est considérablement augmentée, et c'est par milliers de kilogrammes qu'il faut compter les poids qu'il peut porter. Dans les deux cas, dès qu'on ouvre le circuit, la charge se sépare et tombe.

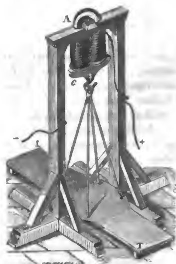


Fig. 1216.

L'énorme puissance magnétique que l'on peut obtenir avec les électro-aimants, a permis de reculer les limites de la science du magnétisme, et a conduit à la découverte de phénomènes nouveaux ; par exemple, les phénomènes du *diamagnétisme*, que nous étudierons dans ce chapitre, et les modifications que subit la lumière dans son passage à travers des substances transparentes soumises à des actions magnétiques très énergiques.

1667. Aimantation au moyen d'électro-aimants. — Le moyen le plus puissant que l'on connaisse pour aimanter un barreau d'acier, consiste à le placer entre les pôles opposés de deux forts électro-aimants droits AB, A'B' (*fig.* 1217), et de faire glisser sur le barreau, un anneau c recouvert de plusieurs tours de fil, en ayant soin de passer le même nombre de fois sur chaque moitié, et en exerçant des frictions. Un même courant parcourt les hélices de même sens des deux électro-aimants et de la bobine c. — Un barreau d'acier, soumis simplement à l'influence des électro-aimants fixes, s'aimante fortement quand on le frappe avec un corps dur, pour ébranler les molécules.

Aimé a imaginé de soumettre le barreau d'acier incandescent, à l'action d'un électro-aimant en fer à cheval, et de le tremper dans cette situation, pour y développer la force coërcitive. Les hélices sont alors préservées du contact de l'eau par une enveloppe en toile goudronnée.



Fig. 1217.

1668. De la cessation des effets avec le courant. — Quand on supprime le courant, l'électro-aimant rentre immédiatement à l'état neutre ; mais il faut, pour cela, que le fer dont il est fait soit complétement dépourvu de force coërcitive. On emploie donc du fer aussi pur que possible ; on le recuit à plusieurs reprises après lui avoir donné sa forme, puis on achève de le travailler à la lime, pour éviter de l'écrouir. Malgré toutes les précautions, il est bien rare qu'il ne reste pas un peu de force coërcitive ; alors les électro-aimants en fer à cheval dont les branches sont relativement les plus longues, sont ceux qui rentrent le moins complétement à l'état neutre. De même, quand on introduit le courant, l'électro-aimant n'arrive pas immédiatement à son maximum de force.

Magnétisme rémanent. — M. Walkins a reconnu que l'armature appliquée aux pôles, empêche la recomposition d'une partie notable du magnétisme, quand on vient à supprimer le courant : si elle se détache sous la charge qu'elle supporte, l'état neutre se rétablit aussitôt ; mais si la charge n'est que le quart ou même le tiers du maximum que l'appareil peut soutenir, l'armature ne se détache pas et peut rester indéfiniment adhérente à l'électro-aimant après la suppression du courant. Si on la sépare violemment, l'électro-aimant conserve encore un peu de magnétisme, et en quantité d'autant plus grande que le contact a été plus prolongé. On a cherché à expliquer ces résultats par l'influence du magnétisme développé dans le fer de l'armature, sur celui du fer de l'électro-aimant.

Le magnétisme, qui persiste sous l'influence de l'armature après la suppression du courant, est désigné sous le nom de *magnétisme rémanent* ; il présente de graves inconvénients dans une foule d'applications. Il disparaît presque totalement, quand on a soin d'interposer entre l'électro-aimant et son armature une lame de bois, ivoire, carton..., ou même une couche d'air, en disposant de petites chevilles de cuivre montées à vis, dont on peut faire varier la longueur. M. Alexandre a reconnu qu'on enléve, ou du moins qu'on diminue beaucoup la faculté qu'a le fer de garder du magnétisme rémanent, en le faisant chauffer fortement dans la flamme de l'alcool pendant que le courant passe. Pendant l'opération, l'hélice est enveloppée de gomme laque qui, malgré son état de fusion, en isole encore suffisamment les tours.

Un faisceau de fils de fer doux, perd plus rapidement son aimantation qu'un barreau massif. Une enveloppe en métal non magnétique, sur laquelle est

enroulée l'hélice magnétisante, retarde au contraire le retour à l'état neutre. Il faut donc employer de préférence des enveloppes en carton, bois, étoffes... Cette influence des enveloppes conductrices est analogue à celle dont nous avons fait mention plus haut (1664), et elle se rattache à la même cause. Elle n'affecte pas, du reste, la force de l'électro-aimant.

1669. Mouvements produits par la suppression ou le renversement fréquent du courant autour du fer doux. — On a imaginé divers appareils qui mettent en évidence la rapidité prodigieuse avec laquelle le magnétisme se développe, disparaît ou change de sens dans le fer doux. Nous allons en décrire quelques-uns.

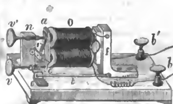


Fig. 1218. — 1/5.

Appareil électro-musical. — Ce petit appareil, imaginé par M. Froment, et nommé aussi *sirène électro-magnétique*, est représenté dans la *fig.* 1218). O est un électro-aimant fixé à un support métallique *f*; une armature en fer doux, *ac*, est appuyée sur la branche inférieure, dans laquelle elle enfonce deux pointes placées sur une même ligne horizontale, autour de laquelle cette armature peut osciller. Le ressort *c*, dont la force est réglée par la vis *v*, écarte l'armature, de l'électro-aimant, et l'appuie contre un second ressort *r* réglé par la vis *v'*. Le courant arrivant par le fil *b*, parcourt le fil de l'électro-aimant, passe dans le support *f*, la tige *t*, la pièce métallique *o*, et le ressort *c*, suit l'armature *ca*, le ressort *r*, et retourne à la pile par le support *n*, qui est séparé de la pièce *o* et communique avec le fil *b'*. Mais aussitôt que le courant est établi, l'armature, attirée par l'électro-aimant, s'écarte du ressort *r*, et le courant est interrompu. Aussitôt, l'armature obéit à l'action du ressort *c*, vient s'appuyer sur le ressort *r*, et le courant étant rétabli, elle est de nouveau attirée, ce qui rompt le circuit...., et ainsi de suite. Ces mouvements sont tellement rapides, qu'il se produit un son musical dont on peut faire varier le ton en agissant sur les vis *v* et *v'*. On peut reconnaître, par ce moyen, si un courant passe dans un circuit, et reconnaître, au son, si l'intensité en est constante ou variable; il faut, pour que l'appareil fonctionne bien, que le fer soit d'une grande pureté.

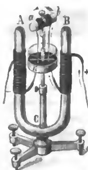


Fig. 1219. — 1/5.

Appareil tournant de Ritchie. — Cet appareil met en évidence la rapidité avec laquelle peut changer le sens de l'aimantation. Entre les branches d'un électro-aimant ou d'un aimant ACB (*fig.* 1219) est fixée une colonne C, à l'extrémité de laquelle peut tourner, autour d'un axe vertical, un petit électro-aimant horizontal *ab*. Les extrémités de l'hélice magnétisante de ce dernier

descendent verticalement, et viennent effleurer la surface du mercure contenu dans un vase cylindrique *n*, divisé par une cloison transversale en bois. Le mercure se trouve, par un effet capillaire (I, 217), plus élevé que la cloison, de manière que les extrémités des fils de l'électro-aimant peuvent plonger dans le mercure, et passer par-dessus la cloison pendant le mouvement de rotation. Les pôles de la pile communiquent, l'un avec le mercure qui est d'un côté de la cloison, l'autre avec celui qui est de l'autre côté. Si le courant passe dans le sens indiqué, le pôle austral de l'électro-aimant *ab* est en *a*, et est repoussé par le pôle homonyme A. Il y a, de même, répulsion entre *b* et B, et *ab* tourne dans le sens de la flèche *ba;* mais quand *a* sera venu tout près de B qui l'attire, les fils verticaux passant par-dessus la cloison changeront de compartiment, le courant sera renversé dans l'hélice de *ab*, et les pôles y seront intervertis ; il y aura donc de nouveau des pôles contraires en présence, et le mouvement continuera ainsi indéfiniment, avec une grande vitesse qui, montre combien le renversement des pôles en *ab* peut se faire rapidement.

Aiguille électro-magnétique de M. Breton. — Ce petit appareil prend un mouvement de rotation sous l'influence de la terre. *ab* (*fig.* 1220) est un électro-aimant assez léger pouvant tourner autour d'un axe qui passe par son centre de gravité, et que l'on dirige perpendiculairement au méridien magnétique. Les extrémités de l'hélice magnétisante sont soudées à deux demi-anneaux métalliques, représentés à part en *o*, *o'*, séparés par de l'ivoire, et pressés par deux ressorts très faibles *r*, *r'* qui communiquent avec les pôles de la pile. L'électro-aimant se place d'abord parallèlement à l'aiguille d'inclinaison, le pôle nord en bas ; mais dès qu'il arrive dans cette position, les demi-anneaux passent d'un ressort à l'autre, le courant est interverti dans l'hélice et le pôle nord se trouve en haut. L'électro-aimant se retourne donc, et la vitesse acquise fait que le mouvement continue dans le sens où il avait commencé.

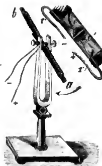


Fig. 1220.

1670. DE LA FORCE DES ÉLECTRO-AIMANTS. — La force des électro-aimants dépend : 1° de l'intensité du courant ; 2° du nombre de spires de l'hélice magnétisante ; 3° de la nature, des dimensions et de la forme du fer ; 4° des dimensions et de la forme de l'armature.

I. Influence de l'intensité du courant. — MM. Lenz et Jacobi avaient trouvé que l'intensité magnétique d'un même électro-aimant, était proportionnelle à l'intensité du courant, quand le fer doux n'était pas trop long par rapport à son diamètre. Mais on peut reconnaître tout d'abord que cette loi ne peut être vraie en général. En effet, il y a, pour chaque barreau de fer, un *état de saturation* qui ne peut être dépassé, quelle que soit l'intensité du courant.

Pour démontrer ce fait important, M. Müller a disposé perpendiculairement

au méridien magnétique, une hélice dans laquelle il pouvait introduire successivement divers barreaux de fer bien doux. Dans la direction de l'axe de ces barreaux était placé le centre d'une aiguille de déclinaison ou d'un magnétomètre (1247), à une distance assez grande pour que la tangente de la déviation fût proportionnelle à la force qui la produisait. Il observait d'abord la déviation produite par l'hélice seule, quand elle était parcourue par le courant en l'absence du barreau de fer, puis quand le barreau était introduit. La différence des tangentes des déviations donnait la mesure de la force magnétique du barreau. L'intensité du courant était mesurée par une boussole des tangentes. M. Müller a reconnu ainsi que la loi n'est approchée que pour les faibles courants, et d'autant plus que le barreau est plus gros par rapport à sa longueur. Ainsi, il l'a trouvée sensiblement exacte, dans les limites de ses expériences, pour un barreau de 44 millimètres de diamètre ; mais pour des barreaux de 15, 12 et 9^{mm} de diamètre, l'accroissement de l'intensité magnétique a toujours été beaucoup moins prononcée que l'accroissement de l'intensité du courant. M. Müller a représenté l'ensemble des résultats qu'il a obtenus, par la formule empirique $I = 220\, d^{\frac{3}{2}}\, tang \frac{m}{0{,}00005\, d^2}$, dans laquelle I est l'intensité du courant, ou plus exactement le produit de cette intensité par le nombre des spires de l'hélice, *d* le diamètre du barreau, et *m* le moment magnétique dû à son action. Quand *d* est grand, et *m*, et par conséquent I, assez petit, le rapport $\frac{m}{0{,}00005 d^2}$ devient lui-même assez petit pour qu'on puisse prendre l'angle pour la tangente, et la formule exprime la loi de MM. Lenz et Jacobi.

Etat de saturation. — On peut conclure de la formule qui précède, que I croissant indéfiniment, *m* tend vers une limite finie, puisqu'une tangente même infinie correspond à un arc fini. Il doit donc y avoir, pour chaque barreau, un *état de saturation*, c'est-à-dire un maximum d'aimantation, dans le voisinage duquel les variations deviennent insensibles quand on augmente beaucoup la valeur de I, c'est-à-dire l'intensité du courant et le nombre de tours de l'hélice.

Pour démontrer l'existence de ce maximum, M. Müller a fait plusieurs séries d'expériences avec des hélices différentes, dans chacune desquelles il introduisait successivement des cylindres en fer bien doux, ayant la même longueur, mais des diamètres différents, et il a représenté les résultats par des courbes, en prenant pour abcisses et ordonnées les valeurs de I et de *m*. La *fig.* 1221 représente les courbes, *a*, *b*, *c*, correspondantes à trois barreaux de 588^{mm} de longueur, et ayant pour diamètre 12^{mm}, 9^{mm} et $7^{mm},1$. La valeur de I variait dans le rapport de 1 à 6 environ. La forme des courbes montre de la manière la plus évidente l'existence d'un maximum, surtout pour le barreau le plus

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LXVIII, p. 119 et 123.

étroit, qui correspond à la courbe c. On voit aussi que la loi de MM. Lenz et Jacobi n'est sensiblement vraie que pour les faibles valeurs de I ; car ce n'est qu'à de petites distances de oy que les courbes se confondent sensiblement avec des lignes droites. L'existenco d'un maximum magnétique avait été d'abord déduite de la théorie par M. Thomson, puis oubliée, établie de nonveau par M. Joule, puis par de Haldat, et enfin par M. Feilitzsch et par M. Müller, qui ignoraient qu'ils avaient été précédés dans la découverte de co fait important.

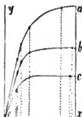


Fig 1221.

II. Des dimensions du fil de l'hélice. — L'intensité magnétique développée dans un barreau de fer paraît être proportionnelle au nombre des tours de l'hélice, du moins tant que le fil n'en forme qu'une seule ; car s'il en formait plusieurs, superposées les unes aux autres, les dernières seraient plus éloignées du barreau et agiraient moins efficacement. Sous ce rapport, un fil fin est donc préférable à un fils plus gros ; mais il ne faut pas oublier qu'un fil plus fin résistant davantage, affaiblit le courant. Il peut donc se faire qu'on perde d'un côté ce qu'on gagne de l'autre. Quand le courant est assez faible pour qu'on puisse admettre la loi de MM. Lenz et Jacobi, la force magnétique développée dans un même barreau avec une même pile, atteint son maximum quand la résistance de l'hélice est égale à celle de la pile.

En effet, l'intensité du courant est donnée par la formule $I = \frac{nE}{R+nr}$ (1620) R étant la résistance de l'hélice. Si nous supposons l'armature assez grosse pour qu'il s'y développe par influence une quantité de magnétisme égale à celle de l'électro-aimant, l'action attractive exercée entre les deux surfaces en contact sera proportionnelle au carré de I; elle est, de plus, proportionnelle au nombre de tours de l'hélice, ou à la longueur du fil qui la forme, ou enfin à R. Cette action sera donc représentée par l'expression $\frac{n^2E^2R}{(R+nr)^2}$, qui a un maximum correspondant à $R = nr$; car, si nous prenons R pour variable, la dérivée sera $\frac{n^2E^2(nr-R)}{(R+nr)^2}$, qui devient nulle pour $R = nr$. Il faudra donc, pour arriver au maximum de magnétisme d'un barreau de fer soumis à l'action d'une pilo donnée, employer de préférence un fil fin faisant un grand nombre de tours. Plus la pile aura de couples, plus il faudra donner de longueur à ce fil. Cette règle pratique peut encore s'appliquer au cas où le courant aurait une grande intensité, qui ne serait plus proportionnelle à la force magnétique développée ; car, dans ce cas, l'affaiblissement que l'allongement du fil fait éprouver à l'intensité du courant, correspond à une faible diminution dans la force magnétique, comme il résulte de l'inspection des courbes de la *fig.* 1221.

1671. III. Dimensions et forme du fer doux. — La force d'un électro-aimant dépend, toutes choses égales d'ailleurs, de la longueur et du diamètre

du fer doux. MM. Lenz et Jacobi, puis M. Müller, avaient trouvé que la longueur des branches d'un électro-aimant n'avait aucune influence sur sa force. M. Dub a trouvé, au contraire, que cette force augmente avec la longueur; ce qui paraît très rationnel; car, quand la longueur est plus grande, les deux pôles contraires sont plus éloignés l'un de l'autre. M. Nicklès [1] a expliqué cette contradiction, en montrant que la force magnétique augmente avec la longueur, quand le barreau est droit, ou quand, étant en fer à cheval, l'hélice n'enveloppe qu'une seule branche, ou est de même sens sur les deux branches. Une expérience frappante prouve l'influence de la longueur des barreaux droits : M. Nicklès approche très près de l'un des pôles de l'électro-aimant, une armature trop lourde pour être soulevée; il allonge ensuite le barreau de fer, en appliquant sur le pôle opposé un cylindre de fer de même grosseur; aussitôt l'armature est attirée, adhère avec force, et se détache dès qu'on enlève le cylindre de fer. Il y a, du reste, une limite à partir de laquelle l'attraction diminue quand la longueur augmente. M. Nicklès annonce aussi que la proposition de M. Dub est vraie pour les électro-aimants en fer à cheval, quand on fait agir l'attraction d'un seul pôle, pour se placer dans les conditions d'un barreau droit. Mais quand on fait agir les deux pôles, la longueur des branches est sans influence.

Distance des pôles. — M. Nicklès a aussi étudié l'influence de la distance des pôles des électro-aimants en fer à cheval [2]. M. Dub avait trouvé que la force ne dépend pas de cette distance quand elle change peu et que le courant est faible. Mais quand le courant est intense, M. Nicklès a reconnu que la force augmente avec la distance des pôles, comme dans les électro-aimants droits, et qu'elle atteint un maximum qui correspond à un écart d'autant plus grand que l'intensité du courant est elle-même plus grande. Pour écarter à volonté les pôles, M. Nicklès se servait d'un électro-aimant formé de deux cylindres en fer perpendiculaires à une barre de même métal sur laquelle un d'eux pouvait se déplacer parallèlement à lui-même.

Grosseur du fer doux. — Toutes choses égales d'ailleurs, un électro-aimant est d'autant plus puissant que le diamètre du fer est plus grand. C'est ce qui résulte de l'inspection de la *fig.* 1221. De plus, la formule de M. Müller exprime que le maximum d'aimantation est proportionnel au carré du diamètre; car si l'on pose $\frac{m}{0,00005\,d^2} = 90°$, on en tire $m = 90° \times 0,00005\,d^2$. Il paraît, au reste, que le résultat dépend plutôt du volume extérieur que de la masse du fer; car de Haldat a reconnu qu'un tube de fer attire tout aussi fortement, pendant le passage du courant, quand il est vide et quand il est rempli par un cylindre de fer prenant bien juste [3]. Nous avons déjà vu comment de Haldat a conclu de là la tendance du magnétisme à s'accumuler vers la surface

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXVII, p. 399.

[2] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XXXIX, p. 635.

[3] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XI, p. 457.

des aimants (1248). Cependant il semble que le fait n'est pas incontestable ; car M. Pfaff a trouvé qu'un électro-aimant creux ne pouvait porter que la moitié de la charge que soutenait un autre appareil identique, mais dont le fer était massif et pesait à peu près deux fois plus. Ayant fait entrer de force un cylindre de fer dans l'électro-aimant creux, la force ne fut pas modifiée[1], Ces résultats semblent infirmer les conclusions de de Haldat. Du reste, ils dépendent de l'épaisseur des parois du tube. En effet, M. Du Moncel trouve qu'il faut, pour que l'aimantation reste la même qu'avec un cylindre massif, que cette épaisseur soit au moins égale au quart du rayon du cylindre.

IV. Influence de l'armature. — Cette influence a été étudiée par MM. Pfaff, Barral, Dub, Nicklès, Du Moncel. La force avec laquelle un électro-aimant retient son armaturo augmente avec la masse de celle-ci ; mais, jusqu'à une certaine limite, pour laquelle la masse de l'armature est inférieure à celle du fer de l'électro-aimant, d'après M. Du Moncel. M. Liais a trouvé, par le calcul, que l'adhérence d'une armature rectangulaire de longueur constante croît comme la racine cubique de la largeur de la face appliquée contre les pôles, et comme la racine carrée de l'épaisseur des faces perpendiculaires à celle-ci. De sorte que, si la même armature est appliquée par une de ses plus larges faces, elle adhère plus fortement que si elle est appliquée par l'une des deux plus étroites ; de plus, à égalité de masse, on obtient le maximum d'effet quand l'épaisseur est environ le tiers de la largeur.

1672. Actions à distance. — Dans tout ce qui précède, nous avons considéré l'attraction exercée sur une armature en contact avec l'électro-aimant. Lorsqu il n'y a pas contact, l'action diminue avec une extrême rapidité quand la distance augmente. Chaque élément magnétique agit bien en raison inverse du carré de la distance ; mais comme tous les points de l'extrémité de l'électro-aimant no sont pas à la même distance du point attiré, et n'ont pas ordinairement la même puissance magnétique, la loi est toute différente quand on considère l'ensemble de leurs actions. On ne sait que peu de chose à cet égard. Voici cependant quelques résultats recueillis par divers observateurs : si l'extrémité du fer doux présente la forme d'un cône à sommet arrondi, la force magnétique est concentrée dans un espace restreint, et la variation d'action avec la distance s'éloigne moins de la loi ordinaire du magnétisme. Il en est de même quand le fer doux est très long par rapport à son diamètre. On exprime quelquefois ce résultat en disant que l'électro-aimant a beaucoup de *force aspirante*. Quand le fer doux se termine par une section droite, la variation est beaucoup plus rapide. M. Barral a conclu d'expériences nombreuses, qu'on peut représenter le poids maximum P que peut porter un électro-aimant agissant sur une armature placée à une distance x de son extrémité, par la formule empirique $P = a : (b + c^x)$; a, b, c étant des constantes qui dépendent des

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LXXV, p. 335.

dimensions et de la forme de l'électro-aimant et de l'armature [1]. Si l'on termine le fer doux par un disque, la surface de ce dernier forme ce que M. Faraday nomme un *champ magnétique*. Généralement, la force magnétique est au maximum sur le contour du champ; on peut le reconnaître par l'expérience, en suspendant une balle de fer au-dessus du centre; on la voit se porter vers les bords.

1673. Différentes formes d'électro-aimants.— Nous avons déja signalé les électro-aimants droits, et en fer à cheval. Les branches de ces derniers sont réunies tantôt par une partie courbe, tantôt par une bande de fer rectiligne, comme dans la (*fig.* 1218). Mais il paraît que, dans ce cas, on ne peut pas développer autant de puissance magnétique, sans doute à cause des solutions de continuité des angles. Ordinairement, on donne aux branches une longueur égale à 3 ou 4 fois leur diamètre, et la distance qui les sépare en dedans est égale à 1 fois $\frac{1}{2}$ à 2 fois ce diamètre. Il est bon que le fer dépasse un peu l'hélice magnétisante.

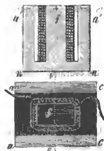


Fig. 1222.

Electro-aimant trifurqué. — Cet appareil, imaginé par M. Nicklès, est représenté, vu par les extrémités des pôles, en *afc* (*fig.* 1222); *a'nna'* est une coupe suivant *oo*. *f*, *f* représente un prisme en fer doux, enveloppé par l'hélice, et *ac*, *ac*; *a'n*, *a'n*, des plaques de fer doux réunies par une plaque de même métal *nn*, et dans lesquelles la même hélice développe une aimantation contraire à celle du prisme *f*, *f*. Les électro-aimants *tubulaires* de MM. Fabre et Kunemann sont établis d'après le même principe : *f* est alors un cylindre en fer doux, et *a'*, *a'* la coupe d'un tube en fer qui enveloppe l'hélice magnétisante.

Frein magnétique. — MM. Nicklès et Auberger ont appliqué les électro-aimants trifurqués à la construction de freins destinés aux chemins de fer; placés très près des rails, ils s'y appliquent et y exercent un frottement considérable par leur adhérence magnétique, dès qu'on y fait passer un courant. Ayant enveloppé la partie inférieure des roues motrices d'une locomotive, avec une hélice enroulée sur un cadre horizontal, dans lequel la roue pouvait se mouvoir sans frottement, ils ont pu augmenter l'adhérence aux rails, par attraction magnétique, de $\frac{1}{8}$ environ pendant le repos; mais l'adhérence était beaucoup moins prononcée pendant le mouvement, à cause du déplacement continuel du pôle inférieur dans le contour de la roue, dont le fer était loin d'être dépourvu de force coërcitive. La pile employée était composée de 64 couples à charbon intérieur.

Electro-aimants circulaires. — Ce genre d'électro-aimant, imaginé par M. Nicklès, et susceptible de diverses applications, consiste en un gros cylindre

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XXV, p. 758.

en fer doux, aux bases duquel sont appliqués des disques en fer *a*, *b* (*fig.* 1223). Le cylindre est entouré d'une hélice magnétisante *m*, dont l'action développe dans les deux disques un magnétisme contraire. L'aimantation se porte principalement vers le bord des disques, comme on peut s'en rendre compte en décomposant l'appareil, par la pensée, en tranches passant par l'axe, tranches que l'on peut considérer comme formées de deux fers à cheval soudés dos à dos. L'hélice étant supposée fixe, et le fer, mobile autour de son axe, on conçoit que la distribution du magnétisme ne changera pas pendant le mouvement, puisque tout y est symétrique autour de l'axe. Un disque de fer appliqué par son contour sur le contour du disque *a*, y adhère fortement et est entraîné dans son mouvement, de manière à former un *engrenage magnétique*. Si les disques *a* et *b* sont appuyés sur des rails, ils y adhèrent de même.

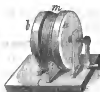


Fig. 1223.

IV. **Mouvements, actions moléculaires et vibrations produites par les courants, dans les corps magnétiques.**

1674. Mouvements du fer doux dans les hélices. — Si l'on introduit dans une hélice AB (*fig.* 1224) parcourue par un courant, un barreau de fer doux FF pouvant s'y mouvoir librement, et dont le milieu ne coïncide pas avec celui de l'hélice, il se met en mouvement jusqu'à ce que la coïncidence ait lieu; et l'on peut, au moyen de poids placés en C, reconnaître quel est l'effort qu'il faut faire pour déranger le barreau de sa position d'équilibre. Du reste, le résultat est le même, que le barreau soit plus court ou plus long que l'hélice. Il est facile de saisir le rapport qu'il y a entre ce fait et les expériences de M. Boisgiraud sur une aiguille flottante (1662); seulement, ici, l'équilibre est toujours stable, parce que le pôle austral est nécessairement à la gauche du courant. Des balles de fer placées dans l'intérieur d'une longue hélice horizontale, roulent jusqu'au milieu, et finissent par s'y arrêter, après avoir fait quelques oscillations. M. Du Moncel s'est servi de ce mode d'action, dans la construction de certains moteurs électro-magnétiques.

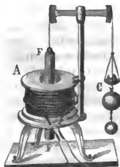


Fig. 1224.

Une tige de fer mobile, se dirige en présence d'un aimant de manière que l'axe magnétique qui s'y forme soit parallèle à la droite qui joint les pôles de l'aimant. Les hélices agissent de la même manière, et un morceau de fil de fer s'y tourne parallèlement à leur axe. Il suffit, pour observer ce résultat, de

poser des brins de fil de fer sur une lame de carton qu'on introduit dans l'hélice (*fig.* 1224) ; on les voit se dresser verticalement. Si l'on jette de la limaille sur le disque de carton, on la voit former, quand le disque est près de l'ouverture, de petites houppes séparées les unes des autres, de 2 à 3 centimètres de hauteur, et qui s'inclinent vers l'axe de l'hélice. Quand le disque est enfoncé jusqu'au milieu de celle-ci, les amas de limaille s'écartent les uns des autres, et se portent vers l'extérieur. Il en est de même avec des brins de fil de fer; ce qui s'explique facilement, car ils forment autant de petits aimants parallèles et orientés de la même manière, dont les pôles homonymes se repoussent.

Ces résultats, observés par M. de La Rive, montrent que les diverses molécules d'un barreau soumis à l'action d'une hélice, sont sollicitées avec des forces inégales et dans des directions différentes; d'où l'on doit conclure qu'elles tendent pendant l'aimantation, à se déplacer les unes par rapport aux autres, et que, par conséquent, le corps magnétique est sollicité à changer de forme. C'est, en effet, ce qui résulte des expériences qui suivent.

1675. Changements de forme et de dimensions du fer soumis à l'action d'un courant. — M. Guillemin [1] ayant enroulé un fil en hélice autour d'un barreau de fer doux de 1^{cm} de diamètre, et de 20 à 30^{cm} de longueur, fixé horizontalement par un bout, et légèrement infléchi par un poids attaché à l'autre, le vit se redresser pendant le passage d'un courant, d'une quantité appréciable sans l'emploi d'instruments grossissants. M. Wertheim a obtenu des résultats semblables; il a reconnu, de plus, que le déplacement n'est pas proportionnel à l'abaissement primitif produit par le poids ; d'où il conclut qu'il n'est pas dû à un changement dans l'élasticité. Il a reconnu, en effet, qu'un fil de fer tendu sur un sonomètre et enveloppé par une hélice, s'allonge de quantités égales sous une charge donnée, quand il est aimanté et quand il est à l'état neutre.

M. Joule a observé des changements de dimensions dans le fer, sous l'influence d'hélices magnétisantes [2] ; mais ces changements sont tels, que le volume ne varie pas ; car, ayant renfermé une barre de fer dans un tube de verre surmonté d'un tube capillaire et rempli de liquide, le niveau ne varia pas pendant le passage d'un courant dans une hélice qui enveloppait le tube. M. Wertheim a confirmé ce résultat, que nous pouvons rapprocher de celui qu'avait obtenu Gay-Lussac, qui a reconnu qu'un tube d'acier surmonté d'un tube capillaire, présente le même volume intérieur, avant et après l'aimantation.

M. Joule a ensuite reconnu qu'une barre de fer s'allonge, pendant le passage du courant dans l'hélice enveloppante. L'allongement était amplifié 3000 fois, au moyen d'une disposition analogue à celle du comparateur (I,18) ; sa valeur, d'autant plus prononcée que le fer était plus doux, était d'environ $\frac{1}{720000}$ de la

[1] *Comptes-rendus de l'Acad. des sc.*, de Paris, t. XXII, p. 264.

[2] *Bibl. univ. de Genève* (Arch. des Sc.), t. IV, p. 98, et t. V. p. 51.

longueur, et paraissait indépendant de la grosseur de la barre. *Pour une même barre, l'allongement semble proportionnel au carré du magnétisme développé.* Quand le courant cesse, la barre de fer se raccourcit moins qu'elle ne s'était allongée, à cause du magnétisme qui persiste. Les barreaux d'acier, quand ils ne sont pas trop fortement trempés, s'allongent aussi, mais bien moins que les barreaux de fer; et, au lieu de se raccourcir quand on supprime le courant, ils éprouvent un nouvel allongement, moindre que le premier; ce qui peut être attribué à l'état de tension des molécules de l'acier trempé, car le fer fortement écroui donne les mêmes résultats. L'influence de l'état de tension est évident quand on opère sur des fils de fer fortement tendus; alors le passage du courant détermine un raccourcissement sensible à partir d'une certaine tension, qui est de 350 kil. au moins pour un fil de 5mm de diamètre. A partir de la limite, le raccourcissement paraît être sensiblement proportionnel à la racine carrée de la tension. L'acier fortement trempé se raccourcit aussi pendant le passage du courant, mais seulement quand ce dernier est capable de lui faire dépasser l'état de saturation relatif au magnétisme permanent; si

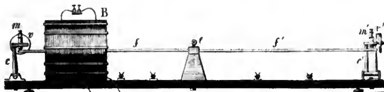


Fig. 1225.

le courant est trop faible pour cela, il n'y a pas de changement de longueur. La compression ne semble produire aucun des effets de la tension.

Cas où le fil sert de réophore. — M. W. Beatson a observé un allongement dans un fil de fer parcouru directement par le courant. Cet allongement a lieu dès que le circuit est fermé, et ne peut se confondre avec celui que produit l'échauffement du fil; car une contraction égale a lieu dès que le courant est interrompu. Ces changements étaient observés au moyen d'un levier attaché au fil par l'un de ses bras, beaucoup plus court que l'autre [1].

Action transversale produite par l'hélice. — Les expériences qui précèdent prouvent que l'action de l'hélice produit une composante parallèle à son axe. Comme les volumes ne varient pas pendant les changements de longueur, il faut qu'il existe aussi des composantes perpendiculaires à l'axe. C'est ce qui résulte directement des expériences de M. Wertheim [2]. Une barre de fer doux *f*, *f'*, fixée par le milieu dans un étau *e* (*fig.* 1225), est entourée par une bobine B composée de 1336 tours d'un fil de cuivre de 2mm,5 de dia-

[1] *Bibl. univ. de Genève* (Archives des sciences), t. II (1846), p. 113.
[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXIII, p. 305.

mètre. Les extrémités de la barre sont placées sous des microscopes m, m', que l'on peut déplacer parallèlement à eux-mêmes, au moyen de vis micrométriques v, v'. Chaque microscope est soutenu par deux colonnes c, c', dont l'ensemble peut tourner autour d'un axe vertical. Quand on place les colonnes comme en c', le microscope se meut dans le sens de l'axe de la barre et sert à en observer les variations de longueur ; quand on les place comme en c, il sert à observer les déplacements latéraux.

Au moyen de cet appareil, M. Wertheim a constaté que : 1° quand l'axe de la barre coïncide avec celui de la bobine, il se produit un allongement, d'autant plus prononcé que la bobine est plus éloignée de l'étau e ; 2° quand cette coïncidence n'a pas lieu, l'allongement est accompagné d'un déplacement latéral vers le côté de l'hélice le plus rapproché. La flèche de ce déplacement à l'extrémité, est d'autant plus grande que la bobine est plus éloignée de l'étau, et que son axe s'écarte davantage de celui de la barre. La flèche est aussi sensiblement proportionnelle à l'intensité du courant. L'unité d'intensité était celle qui faisait dévier de 10° l'aiguille d'un réomètre. En désignant par P le poids qui produirait la même flèche f rapportée à l'unité d'intensité, quand la distance D est successivement de 80^{mm} et 50^{mm}, M. Wertheim a trouvé les résultats moyens qui suivent :

BARRES DE FER.			POUR $D=80^{mm}$.		POUR $D=50^{mm}$.	
LONGUEUR.	LARGEUR.	ÉPAISSEUR.	f.	P.	f.	P.
997^{mm}	10^{mm}	10^{mm}	$0^{mm},1337$	$6^{gr},408$	$0^{mm},0727$	$3^{gr},484$
916	12	3,37	0,9377	2,673	0,4747	1,493
981	5	5	0,4648	1,462	9,2853	0,813

Le poids P s'appelle l'équivalent mécanique de l'unité d'intensité du courant ; il se calcule au moyen des formules de l'élasticité (I, 436). En représentant par 100 la force mécanique qui correspond à la première barre, on trouve pour les autres 41,71 et 22,81, quand on a $D = 80$; et 42,82 et 23,34, quand on a $D = 50$. L'équivalent mécanique, qui est proportionnel à l'intensité du courant, est donc aussi en raison directe de la masse de fer sur laquelle il agit ; car les sections, et par conséquent les masses des trois barres, sont entre elles comme 100, 40,50 et 25. Des résultats semblables ont été obtenus avec d'autres valeurs de D comprises entre 0^{mm} et 80^{mm}.

1676. Déplacements moléculaires pendant l'aimantation. — Les mouvements de totalité observés dans les expériences qui précèdent sont la conséquence de déplacements moléculaires, qui peuvent être attestés de diverses

manières, entr'autres par l'échauffement qui en résulte. M. Van-Bréda ayant enveloppé un tube de fer, d'une hélice dans laquelle il faisait passer un courant intermittent, constata un échauffement du fer, dû aux déplacements alternatifs des molécules, échauffement attesté par la dilatation de l'air contenu dans le tube, qui formait le réservoir d'un thermomètre à air [1]. M. Grove a obtenu plus tard l'échauffement d'une armature en fer doux, en faisant passer un courant intermittent dans le fil d'un électro-aimant sur lequel elle était appliquée, ou en faisant tourner en sa présence les pôles d'un fort aimant. L'échauffement était indiqué par un couple thermo-électrique. Le cobalt, le nickel ont donné des résultats semblables, mais moins prononcés; tandis que les métaux non magnétiques ne s'échauffaient pas dans les mêmes circonstances. M. Moll a trouvé qu'un barreau de fer, qui a été aimanté dans une hélice, s'aimante moins fortement en sens contraire, quand on intervertit le courant, surtout quand le premier état a persisté pendant longtemps. Mais si l'on change fréquemment le sens de l'aimantation, le fer finit par s'aimanter aussi facilement dans un sens que dans l'autre; ce qui indique que sa structure a été modifiée.

Arrangement des molécules en séries. — Les molécules de fer ont une tendance à se disposer en séries parallèles à l'axe de l'hélice. Ce fait important résulte de plusieurs expériences. Par exemple, M. Maggi a constaté que la conductibilité d'une plaque de fer pour la chaleur est plus grande pendant l'aimantation, dans la direction perpendiculaire à l'axe magnétique que dans toute autre direction [2]. Il employait la méthode par laquelle on étudie la conductibilité des cristaux (II,815) : la plaque circulaire, garnie d'une mince couche de cire, recevait la chaleur par un petit tube qui la traversait par son centre, et dans lequel circulait de la vapeur d'eau. La cire fondait en formant une tache circulaire quand la plaque était à l'état naturel; mais quand elle était appuyée sur les deux pôles d'un fort électro-aimant, la tache s'allongeait dans la direction perpendiculaire à la ligne des pôles, direction suivant laquelle la densité augmente, puisque l'aimantation produit un allongement sans changement de volume (1675).

M. Grove a fait une expérience curieuse, qui prouve que les particules de fer prennent un arrangement régulier sous l'influence de l'hélice magnétisante. Il remplit d'eau tenant en suspension des parcelles de fer précipitées chimiquement, un tube de verre fermé à ses extrémités par des glaces polies. La lumière était très affaiblie en passant à travers le liquide; mais dès qu'on faisait passer un courant dans une hélice qui entourait le tube, le liquide devenait subitement beaucoup plus transparent. Les expériences de M. de La Rive, sur la limaille de fer, montrent aux yeux cette tendance des particules à s'arranger en files parallèles à l'axe de l'hélice (1674).

1677. Applications à la théorie de l'aimantation. — Il résulte de ce

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XXI, p. 961.

[2] *Bibliothèque universelle de Genève* (Archives des sciences, 1849), t. XIV, p. 132.

qui précède, que les molécules prennent des positions particulières pendant l'aimantation. Si ces positions persistent quand la cause magnétisante cesse d'agir, on a un aimant permanent. Toutes les actions qui ébranlent les molécules pendant l'aimantation, la facilitent en aidant à leur déplacement ; d'un autre côté, ces actions détruisent l'aimantation en favorisant le retour aux positions d'équilibre primitif. C'est ainsi qu'agissent le choc, les vibrations, la chaleur. Il semble donc, si l'on admet la théorie de Coulomb, que les particules posséderaient d'avance la polarité magnétique, et que l'aimantation consisterait dans leur orientation suivant certaines directions. La force coërcitive doit donc bien appartenir aux substances dont les molécules sont difficiles à déplacer, c'est-à-dire aux substances peu malléables, comme l'acier trempé, le fer écroui.

Il résulte de là que si l'on pouvait par des moyens mécaniques donner aux particules des positions nouvelles, on pourrait, dans certains cas, augmenter l'aimantation sans employer ni les aimants, ni l'électricité. Quelques faits viennent à l'appui de cette présomption : ainsi, M. Lagehrjelm a vu du fer doux s'aimanter fortement par la rupture. M. Matteucci a vu une torsion modérée augmenter l'aimantation d'aiguilles d'acier ; et M. Wertheim, la torsion modifier l'aimantation de fils de fer d'une manière permanente ou temporaire, suivant qu'elle était elle-même permanente ou temporaire [1].

1678. Coexistence de deux états magnétiques différents. — M. Marianini a été conduit par plusieurs faits remarquables, à admettre, dans certains cas, la coexistence de deux états magnétiques différents, dans le fer qui a été soumis à l'action des courants [2]. Il a d'abord constaté qu'un fil de fer, d'acier ou de nickel qui a été aimanté par la décharge d'une petite bouteille de Leyde à travers une hélice qui l'enveloppe, et qui a ensuite perdu son magnétisme par des décharges en sens inverse, s'aimante plus fortement dans le sens de la première décharge, quand on la reproduit avec la même intensité. Le fer qui a été aimanté dans un sens, puis ramené à l'état neutre, possède donc une aptitude plus grande que le fer neuf à s'aimanter dans ce même sens. Au contraire, l'aptitude à s'aimanter dans l'autre sens est diminuée, et au même degré. On peut, en opérant avec des courants contraires à ceux qu'on a d'abord employés, changer le sens pour lequel l'aptitude est augmentée. Enfin, en renversant fréquemment le sens de la décharge, on finit par faire disparaître toute différence d'aptitude. Ces résultats se manifestent encore, quand le fer, au lieu d'être ramené à l'état neutre, conserve une partie de son aimantation primitive, ou même reste un peu aimantée en sens contraire.

On obtient des résultats semblables, quand l'aimantation et sa destruction sont produites par un courant voltaïque, par un aimant ou même par l'influence

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XXIII, p. 336.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XVI, p. 436 et 448.

de la terre. Quand l'aimantation est détruite par la chaleur, il n'y a plus aucune différence d'aptitude.

Dans ces expériences, M. Marianini mesurait l'état magnétique du fer, au moyen d'un instrument de son invention, qu'il nomme *ré-électromètre*, et qui consiste en une hélice fixée perpendiculairement à une aiguille de déclinaison, et dans laquelle on introduit le barreau de fer pour l'aimanter. Ce barreau fait dévier alors plus ou moins l'aiguille, suivant le degré d'aimantation qu'il a reçu.

Pour expliquer ces résultats, M. Marianini admet qu'il existe, dans le fer qu'on a aimanté puis ramené à l'état neutre au moyen de courants, des particules présentant des états magnétiques contraires, et dont les actions se contrebalancent. En effet, quand on soumet à un choc, le barreau ramené à l'état neutre, on le trouve aimanté dans le sens primitif. Par exemple, un cylindre de fer de 9 centimètres de long et pesant 16 grammes environ, était aimanté de manière à faire dévier de 60° l'aiguille du ré-électromètre. Le cylindre fut ramené à l'état neutre au moyen de décharges convenables, puis on le laissa tomber sur le pavé, successivement de 4, 5 et 20 décimètres; il se trouva aimanté de manière à dévier l'aiguille de 14°; 15°,30; et 20°. Quand le barreau, au lieu d'être ramené à l'état neutre, est un peu aimanté en sens contraire du sens primitif, un choc fait reparaître l'aimantation dans ce sens primitif. On peut, dans ces expériences, remplacer le choc, par le frottement, la flexion, la chaleur, et même des décharges à travers le barreau. Des expériences préalables avaient prouvé que toutes ces actions sont incapables d'aimanter le fer neuf. Pourquoi maintenant la diminution porte-t-elle plus particulièrement sur l'état magnétique établi en second lieu, et qui contrebalance celui qu'on avait établi d'abord? c'est que le dernier état s'obtient par tâtonnement, au moyen de faibles décharges qui déterminent des états magnétiques faibles dans des particules de plus en plus nombreuses, et l'expérience prouve que le choc, la chaleur.... diminuent relativement davantage l'aimantation quand elle est faible que lorsqu'elle est plus forte. Pour rendre cela plus évident, M. Marianini a annulé les effets magnétiques de 6 fils de fer, au moyen de 5 autres réunis en faisceau avec les premiers; ayant placé le faisceau dans une hélice, et ayant déchargé une bouteille de Leyde de manière à produire l'aimantation dans le sens des 6 premiers fils, le faisceau put dévier l'aiguille du ré-électromètre, de 49°; tandis qu'il ne la déviait que de 22°, quand la décharge était faite en sens contraire; il retrouvait donc ainsi les différences d'aptitude que présentent les barreaux de fer.

1679. SONS PRODUITS PAR LES COURANTS. — Les mouvements moléculaires et les changements de dimensions qui se manifestent subitement dans les substances magnétiques au moment de l'aimantation, sont assez prononcés pour produire des vibrations sonores. Ce phénomène, dont la découverte a précédé et provoqué celle des effets moléculaires dont nous venons de parler, a été observé pour la première fois, en 1837, par M. Page, sur un aimant en fer à

cheval dont il approchait rapidement les pôles, d'une spirale plate parcourue par un courant. L'année suivante, M. Delezenne obtint aussi un son en faisant tourner une armature de fer devant les pôles d'un aimant, ou *vice versâ* MM. de La Rive, Beatston, Marrian[1], Gassiot, observérent qu'il se produit un son musical dans une barre de fer, au moment où l'on introduit un courant dans une hélice qui l'enveloppe. M. Marrian a reconnu que le son est le même que celui que rend la barre quand on la frappe à son extrémité. M. Beatston a constaté qu'une barre d'acier fortement trempée ne produisait pas de son, mais qu'elle en rendait un de plus en plus intense, à mesure qu'elle était plus complètement recuite.

M. de La Rive a le premier attribué lo son produit à l'espèce de choc qui a lieu lors du déplacement brusque des molécules, au moment où elles reçoivent l'action du courant. Pour augmenter l'intensité du phénomène, il n'y a donc qu'à rendre ce choc très fréquent, en faisant passer le courant par intermittences très rapprocbées. M. de La Rive a fait usage pour cela de différents appareils, entr'autres d'une roue dentée métallique disposée comme celle de M. Pouillet (1563). Il a pu ainsi produire un son clair et soutenu dans un cylindre de fer de 10 centimètres de diamètre, pesant 10 kilos. Le son était celui que produisent les vibrations longitudinales.

Un fil de fer tendu sur un appareil analogue au sonomètre, donne le son qui correspond aux vibrations transversales, accompagné de ses barmoniques, et présentant une intensité d'autant plns grande que l'une des extrémités de l'hélice est plus près du milieu de la corde, ou d'un des nœuds qui tendent à s'y former. Il ne faut pas que les interruptions du courant soient trop rapprochées. Plus le fer est doux, plus le son est intense ; l'acier trempé n'en produit qu'un très faible. Il y a aussi, pour chaque fil, un degré de tension pour lequel l'intensité totale du son est maximum. Si l'on dépasse cette tension, l'intensité diminue, ainsi que le nombre des barmoniques que l'on peut distinguer ; les plus aigus disparaissent les derniers, et l'on finit par ne plus entendre que le son provenant des vibrations longitudinales.

Courant transmis. — M. Beatston et M. de La Rive ont reconnu qu'un courant intermittent *transmis* à travers le fil tendu, lui fait aussi produire des sons, qui sont les mêmes qu'avec une bélice ; le son fondamental est seulement un peu plus bas, à cause de l'échauffement du fil. M. de La Rive trouve que ce son est d'autant plus intense que le fil est plus court et que sa résistance à la conductibilité se rapproche davantage de celle de la pile. Avec un fil de fer doux, le son est plus fort que celui que produit une hélice, surtout si le fil est fin, et le courant assez fort pour l'échanffer un peu. Quand le fil est écroui, et surtout quand il est en acier, le son produit par le courant transmis est au contraire plus faible que celui qui a lieu avec nne hélice. Si l'on échauffe le fil, l'intensité

[1] *Arch. de l'électr.*, t. V, p. 195 à 233 ; et *Ann. de ch. et de ph.*, 3e série, t. XVI, 93.

diminue. Cependant il semble que, dans le cas du courant transmis, l'intensité augmente sous l'influence du mouvement d'accroissement de la température.

M. Wertheim a obtenu des vibrations par le passage d'un courant discontinu à travers la tige rigide *ff'* de son appareil (*fig.* 1225); de fines pointes verticales adaptées aux extrémités, et plongeant dans des capsules de mercure, donnaient passage au courant intermittent. La hauteur du son restait la même quand les crochets étaient placés de manière que le courant ne parcourût qu'une partie de la tige; seulement l'intensité était moindre.

Battements. — Indépendamment des sons musicaux, on entend encore, dans tous les cas, des chocs ou battements, qui coïncident avec les interruptions du courant, et que M. de La Rive compare au bruit que font des gouttes de pluie en tombant sur un toit en métal. Ce qu'il y a de très curieux, c'est que ces battements se produisent avec la limaille de fer, et même avec du fer, du cobalt, du nickel, en poudre impalpable obtenue par précipitation des oxydes par l'hydrogène. La poudre est placée en couche de 2 à 3^{mm}, dans une boîte que l'on introduit, au moyen d'une tige fixée en son milieu, dans une hélice verticale. Les chocs coïncident toujours avec les interruptions du courant; de plus, la poudre s'agite tant qu'il n'y en a pas plus de 80 par seconde, et on la voit former des pyramides qui tournoient avec rapidité.

1680. Explication du son provoqué par les courants. — Pour expliquer le son que produit le fer pendant le passage du courant discontinu dans une hélice qui l'enveloppe, M. de La Rive remarque que le courant tend à disposer les molécules du fer en files longitudinales (1674), et que ces molécules vibrent par élasticité, en revenant à leur position d'équilibre pendant les interruptions. Les bruits secs ou battements qui coïncident avec les intermittences du courant, sont dus au déplacement brusque des molécules, et peuvent être comparés au bruissement qui accompagne le frottement de l'archet sur une corde. Le son est d'autant plus intense que le fer est plus doux, parce que les molécules y sont plus mobiles que dans le fer écroui ou dans l'acier. Si le fil de fer est aimanté par l'influence d'un aimant ou d'une autre hélice, le son est plus fort quand le courant intermittent a pour effet de produire une aimantation de sens contraire, et il est plus faible quand il tend à en produire une de même sens; c'est que, dans ce dernier cas, les molécules sont d'avance dans des positions très rapprochées de celles que tend à leur imposer le courant. Une trop grande tension, en donnant aux particules une position forcée, diminue leur mobilité et rend le son plus faible.

Les mouvements de totalité observés par M. Wertheim (1675) lui ont servi à rendre compte des différents sons produits. La barre *ff'* (*fig.* 1225) placée suivant l'axe de l'hélice dans laquelle on fait passer le courant intermittent, rend un son, en vibrant longitudinalement. Ce son dépend donc de la longueur de la barre, et non de la forme et de l'aire de sa section. L'amplitude des vibrations est assez grande pour que M. Wertheim ait pu les enregistrer par la méthode graphique, sur une lame de verre recouverte de noir de fumée.

Quand la barre est en dehors de l'axe de l'hélice, le son longitudinal est moins pur, et il est accompagné de vibrations transversales visibles à l'œil nu, mais donnant un son tellement faible, qu'on ne le distingue qu'en appliquant l'oreille sur la table de l'appareil.

Avec des fils soumis à une tension suffisante, qui est d'autant plus forte que le fil est plus fin, on n'entend que le son longitudinal très pur ; mais à mesure qu'on diminue la tension, on entend des sons provenant des vibrations transversales, accompagnés d'un bruit de ferraille tout particulier, et d'autres bruits difficiles à définir, et distincts surtout avec les fils un peu gros. Ces bruits paraissent dus à un ballottement transversal, car ils disparaissent quand on empêche ce ballottement au moyen d'une tension latérale.

Courant transmis. — Quand le courant parcourt directement un fil de fer ou d'acier, les particules tendent à s'y disposer transversalement, comme le montre l'expérience (1663). Le courant discontinu doit donc déplacer ces particules dans ce sens, et les laisser alternativement revenir à leur position d'équilibre ; d'où des chocs coïncidant avec les intermittences du courant, et le son longitudinal qui les accompagne[1]. A l'appui de cette explication, M. de La Rive a opéré sur un fil de cuivre enveloppé d'une gaîne en fer, contiguë ou séparée par une couche de soie ou de cire ; le passage du courant discontinu dans le fil de cuivre a produit les mêmes effets, seulement moins intenses. Une fente longitudinale ayant été pratiquée dans l'enveloppe de fer, les deux bords se trouvèrent aimantés en sens opposé. M. Wartmann a confirmé les explications de M. de La Rive par de nombreuses expériences[2].

Si le fil est parcouru par un courant continu, en même temps que par le courant intermittent, et si les deux courants sont de même sens, le son cesse, ou du moins est considérablement affaibli ; c'est que le courant intermittent trouve les particules disposées, par le courant continu, comme il tend à les placer lui-même. Si le fil de fer doux est remplacé par un fil écroui ou par un fil d'acier, le courant continu favorise au contraire le développement du son, en ajoutant son action à celle du courant intermittent, qui ne peut que difficilement vaincre la résistance que les particules opposent au déplacement.

Si l'un des deux courants passe par une hélice, pendant que l'autre suit le fil de fer, comme le premier tend à tourner les particules dans une direction perpendiculaire à celle dans laquelle le second les sollicite, elles éprouvent des oscillations très prononcées, et l'on entend un son particulier très aigu. Quand le fil est aimanté, on obtient encore ce son aigu, au moyen d'un seul courant discontinu passant dans le fil, l'aimantation ayant pour effet de disposer les particules tout autrement que le courant ne tend à les tourner. Le fer aimanté traversé par un courant continu, et soumis à l'action intermittente d'une hélice, rendant le même son particulier qu'un fil d'acier trempé non aimanté, M. de

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XVI, p. 93, et t. XXVI. p. 185.

[2] *Bibl. univ. de Genève* (Arch des sc.), t. V, p. 419.

La Rive en conclut que l'aimantation donne vraisemblablement aux particules du fer doux, une disposition semblable à celle que la trempe donne aux particules de l'acier.

1681. Mouvements vibratoires dans les corps non magnétiques.— M. A. de La Rive a obtenu des vibrations en faisant passer un courant discontinu dans de gros fils de métaux non magnétiques; mais il faut que ces fils soient entourés d'une hélice, ou placés très prés des pôles d'un électro-aimant, dans lesquels passe un courant continu. Cependant, on obtient encore un son, quand le fil que parcourt le courant discontinu est plié en hélice ; les spires agissant les unes sur les autres pendant le passage de ce courant, et les actions réciproques remplaçant l'effet de l'hélice extérieure nécessaire quand le fil est rectiligne. Un courant continu transmis dans le fil contourné en hélice et dans le même sens que le courant intermittent, fait cesser, ou du moins affaiblit notablement le son; tandis que, si ce courant continu passe dans une hélice extérieure, il renforce le son. Il semble résulter de là que l'hélice extérieure, ou l'électro-aimant, imprime aux particules du métal non magnétique un déplacement qui leur donne des positions analogues à celles qui existent dans les métaux magnétiques, positions que le courant discontinu vient changer par intermittences. Un courant continu dans le fil en hélice, imprime d'avance aux particules, la position que devrait leur donner le courant discontinu, et il n'y a plus de son. L'hélice extérieure renforce au contraire le son quand le courant y marche dans le même sens, parce qu'elle dispose les particules tout autrement que le courant discontinu, auquel ses spires sont sensiblement perpendiculaires.

Il n'est pas nécessaire que le corps soit long et mince, pour rendre un son : une rondelle de laiton de 12^{cm} de diamètre et de 1^{mm} d'épaisseur, produit ce phénoméne quand on la soutient horizontalement par une tige métallique, dans une hélice verticale parcourue par un courant continu, et qu'on fait passer un courant intermittent du centre à la circonférence, ou réciproquement. Le mercure lui-même peut rendre des sons : on l'introduit dans un tube de quelques millimètres de diamètre contourné de manière à envelopper à peu prés le pôle d'un électro-aimant, et on le fait traverser par le courant intermittent. Le son est semblable à celui que produirait une série de petites étincelles.

Le sifflement que produit l'arc voltaïque sous l'influence de l'électro-aimant (1535) est un effet du même genre ; car le courant dans l'arc voltaïque est une suite de décharges très rapprochées. Tous ces effets indiquent, du reste, une action du magnétisme sur tous les corps; nous verrons en effet que tous, même les gaz, obéissent aux actions magnétiques énergiques.

Sons dans les fils télégraphiques. — Il nous reste à signaler les sons musicaux que produisent assez souvent les fils de fer des télégraphes électriques, sons qui ont été observés pour la première fois par M. Janiar. On les a expliqués d'abord par le passage des courants intermittents qui servent à la production des signaux. Mais il est à remarquer qu'ils ne se manifestent pas

indifféremment dans tous les états atmosphériques. M. de La Rive est plus disposé à les attribuer à l'écoulement de l'électricité de l'atmosphère ; et il cite à l'appui de cette opinion une observation faite, en 1821, à Bâle, par M. Haas, qui remarqua qu'un long fil de fer tendu à 1 mètre environ du sol, rendait un son quand le temps devait changer [1].

§ 2. — ÉLECTRO-DYNAMIQUE.

I. Action des courants les uns sur les autres.

1682. A peine l'expérience d'Œrsted (1658) était-elle connue en France, qu'Ampère découvrait un phénomène nouveau, l'action des courants électriques les uns sur les autres, et entreprenait cette série de belles recherches expérimentales et théoriques qui l'ont conduit à la création d'une science nouvelle, l'*électro-dynamique*. Les appareils au moyen desquels ce savant illustre a établi les principes de cette science et en a vérifié les conséquences, ont reçu, de lui-même et de divers physiciens, des modifications nombreuses destinées à les simplifier et à en faciliter l'usage. Ne pouvant faire connaître toutes les dispositions qui ont été successivement employées, nous nous attacherons à décrire les plus simples, et celles qui sont le plus généralement adoptées. Ampère avait imaginé de rassembler en un seul appareil, connu sous le nom de *table d'Ampère*, toutes les pièces nécessaires à la reproduction de la plupart de ses expériences ; mais la complication de cet appareil, et la difficulté de suivre la marche des courants à travers toutes les pièces qui le composent, l'ont fait abandonner, et l'on préfère aujourd'hui se servir d'instruments distincts, pour la démonstration de chaque genre de phénomène.

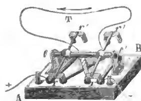
1683. Commutateurs. — Dans les expériences de l'électro-dynamique, il est souvent utile de changer le sens des courants. On a imaginé pour cet objet des petits instruments fort commodes, désignés sous le nom de *commutateurs*. Nous allons en décrire cinq. Il en existe un plus grand nombre, et nous aurons occasion d'en faire connaître quelques autres, en décrivant les appareils dans lesquels on en fait usage.

1° Ampère a imaginé le premier *commutateur*, dit *à bascule* (*fig.* 1226). *ab*, *a'b'*, *cd* sont des rigoles creusées dans une planche et remplies de mercure, et *c'* et *d'*, deux cavités remplies du même liquide et réunies par une bande de cuivre *c'd'* qui croise la rigole *cd* en passant par dessus. Les pôles de la pile s'enfoncent dans le mercure en *a*, *a'*, et les extrémités de la partie T du circuit dans laquelle on veut changer à volonté le sens du courant, dans les cavités *d*, *d'*. Si l'on joint *a*, *c* et *c'*, *a'* par des arcs métalliques, le courant marche, en T, dans

[1] *Bibliothèque universelle de Genève* (Arch. des sc.), t. II, p. 395.

le sens *dTd'*. Si, au contraire, on réunit *bd'* et *b'd*, le courant marche comme les flèches ponctuées. La disposition des quatre arcs qui servent à établir les communications se voit dans la figure en perspective AB; ils sont adaptés aux extrémités de leviers *rr'*, *rr'* fixés perpendiculairement à l'axe *oo'*, au moyen duquel on peut les faire basculer de manière à établir les communications par les arcs *r*, *r* ou les arcs *r'*, *r'*, à volonté.

2° La (*fig.* 1227) représente le commutateur de M. Ruhmkorff. Un cylindre *a* en ivoire est recouvert en partie de deux plaques de cuivre *c*, *i'*, dont l'une, *c*, communique avec le support *o* auquel s'attache le fil positif de la pile; et l'autre avec le support *o'*, auquel s'attache le fil négatif. Deux ressorts opposés s'appuient sur le cylindre; le premier, *r*, communique avec l'une des extrémités du fil du circuit, fixée à la *borne* à vis *i*; l'autre communique par la lame *c'* avec l'autre extrémité. Dans la position figurée du cylindre, le courant entre en *o*, passe par la plaque *c* dans le ressort *r*, parcourt le circuit et revient à la pile



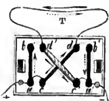


Fig. 1226.

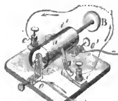


Fig. 1227.

par *c'*, la plaque *i'* et le support *o'*. Si l'on tourne le cylindre *a* de 180°, au moyen du bouton B, de manière à mettre la plaque *i'* en contact avec le ressort *r*, et la plaque *c* avec le ressort opposé, le courant passe de *c* en *c'*, et revient à la pile par le ressort *r* et le support *o'*. Si les extrémités des ressorts tombent entre les plaques métalliques, le courant est interrompu.

3° O (*fig.* 1230), est un cylindre en bois garni de deux plaques métalliques *c*, *c'*, sur le contour duquel s'appuient quatre ressorts *r*, *r'*, *s*, *s'* disposés en croix et fixés à des bornes à vis auxquelles on attache les réophores *p*, *p'* de la pile et les extrémités du circuit T. Quand le cylindre est placé comme dans la figure, le courant marche, en T, dans le sens de la flèche; mais si l'on fait tourner le cylindre de 90°, de manière que les 2 ressorts *r*, *s*, s'appuient sur une même plaque métallique, et les 2 ressorts *s*, *s'* sur l'autre plaque, le courant change de sens en T.

4° Dans le commutateur de la *fig.* 1228, deux paires de lames en laiton *ll'*, *l'' l'''*, sont portées par des colonnes *o*, *o'*, auxquelles s'attachent les fils de la pile. Ces lames s'appuient par leur extrémité libre sur quatre bornes en métal, qui communiquent au moyen de fils obliques dont deux se croisent sans se toucher, avec les boutons *a*, *a'* qui reçoivent les extrémités du circuit T. Un

cylindre en bois c, c′, mobile autour de son axe, porte des renflements qui soulèvent les lames l', l'', ou les lames l, l''', suivant que la manivelle *n* est placée comme dans la figure, ou du côté opposé. Quand les lames l et l''' sont seules soulevées, le courant suit la direction des flèches. Quand elles sont abaissées par leur élasticité, et les lames l' et l'' soulevées à leur tour, le courant suit en T la direction opposée. Quand la manivelle est perpendiculaire à la table de l'instrument, le cylindre *cc′* présente un renflement, aux quatre lames en même temps, et le courant est interrompu ; l'appareil peut donc, comme les deux premiers, faire fonction d'*interrupteur*.

5° M. Bertin a imaginé le commutateur *fig.* (1229). Sur un disque en bois sont deux bandes de cuivre *oa*, *cnc′*. La première, *oa*, est fixée à un arbre en métal autour duquel peut tourner le disque, et qui communique avec la borne à laquelle on fixe l'un des réophores de la pile ; l'autre réophore se fixe en *n*. Les

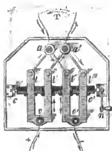


Fig. 1228.

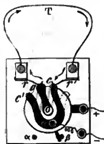


Fig. 1229.

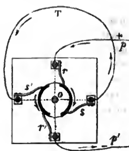


Fig. 1230.

extrémités du circuit T aboutissent aux ressorts *r*, *r′*. Quand le disque est tourné comme dans la figure, le courant passe, en T, dans le sens de la flèche. Si l'on tourne le disque de manière que les bandes *oa*, *cc′* prennent les positions indiquées en lignes ponctuées, le courant change de sens en T. $\alpha\beta$ sont des chevilles qui limitent les mouvements du disque.

1684. — Nous allons maintenant étudier les actions qu'exercent les uns sur les autres, les conducteurs parcourus par les courants. Comme ces actions sont dues à l'électricité, on les énonce en substituant au mot *conducteur*, le mot *courant*. De même, quand on parle de *courants rectangulaires*, *circulaires....*, on entend des fils réophores pliés en forme de *rectangle*, de *cercle....* Pour obtenir des actions intenses entre les courants, il faut qu'ils soient produits par des piles à grands éléments. Ampère employait une pile de 10 à 12 couples à grande surface formés de lames de zinc plongeant dans de l'eau acidulée contenue dans des vases en cuivre (1434, *fig.* 1057). Aujourd'hui, on emploie, pour répéter ces expériences, les piles à charbon.

Les actions des courants les uns sur les autres sont très variées ; mais on

peut les faire dépendre de cinq principes d'expérience établis par Ampère [1], et que nous allons d'abord faire connaître.

1685. I. Actions des courants parallèles. — *Deux courants parallèles s'attirent quand ils sont de même sens, et se repoussent quand ils sont de sens contraire.* Pour prouver ce principe, il fallait d'abord rendre une partie du circuit assez mobile pour qu'elle pût obéir aux actions attractives ou répulsives. Ampère a rempli cette condition au moyen d'un mode de suspension très ingénieux, dont la *fig.* 1231 donnera une idée. *cbndo* représente un fil de cuivre plié en forme de rectangle, pouvant tourner autour d'un axe vertical qui le partage en deux parties égales. Pour cela, une des extrémités *o* de ce fil se recourbe et porte une pointe d'acier, qui s'appuie sur une lame de verre fixée au fond d'une petite coupe métallique remplie de mercure. Le rectangle peut pivoter avec la plus grande facilité sur la pointe *o*. Il porte en *n* un anneau assez large, qui embrasse la colonne *no* sans la toucher. L'autre extrémité du fil de cuivre porte une petite coupe en métal *c* remplie de mercure, dans laquelle s'enfonce, sans en toucher le fond, une tige à vis *t*, qui communique par une bande de cuivre avec la colonne métallique B. Le pôle positif d'une pile étant mis en communication avec le pied de la colonne *no*, le courant monte par cette colonne, suit dans le rectangle mobile la direction des flèches, et revient à la pile par la coupe *c*, la tige *t*, et la colonne B dont le pied communique avec le pôle négatif. On obtient ainsi deux portions de courants parallèles B, *b*, dont l'une, *b*, est mobile. Si ces deux portions marchent en sens opposé, comme dans la figure, on voit la partie *b* s'éloigner vivement de la colonne B en décrivant un cylindre autour de *no*. Si, au contraire, on retourne le rectangle, de manière à mettre le côté *d* auprès de B, les courants en présence sont de même sens, et l'on voit la partie *d* marcher vers B et finir par s'arrêter à la plus petite distance possible, après avoir fait quelques oscillations. — On obtient des effets plus intenses en faisant arriver le courant par le haut de la colonne D, dont on fait alors communiquer le pied avec celui de la colonne *no* ; l'action de D sur *d* s'ajoute à celle de B sur *b*, pour faire tourner le rectangle,

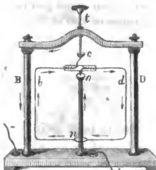


Fig. 1231. — 1/12.

Ces actions sont tout à fait distinctes de celles que produit l'électricité de tension : 1° elles cessent aussitôt que le courant est interrompu ; 2° l'attraction a lieu quand les extrémités de même nom sont en présence ; 3° l'attraction n'est pas suivie de répulsion après le contact.

[1] *Ann. de ch. et de ph.*, 2e série, de 1820 à 1828, et *Théorie des ph. électro-dyn.* (1826).

M. G. de La Rive a imaginé un système de courants mobiles, dont l'usage a été généralisé par A. Pinaud, et qui peut remplacer celui que nous venons de décrire. Le fil de cuivre *bad* (*fig.* 1232), est porté par un disque en liége, flottant sur de l'eau acidulée, et sous lequel sont fixées une lame de zinc *z* et une lame de cuivre *c* formant un couple. Les pôles de ce couple sont mis en communication avec les extrémités du fil de cuivre, dans lequel circule alors un courant allant du cuivre au zinc. Si l'on approche en *mn* un fil vertical joignant les deux pôles d'une pile, ce fil attire le côté *ad*, si les courants en présence sont de même sens. Si l'on présente le fil horizontal *mn'* latéralement au côté *ab*, on voit ce côté se déplacer parallèlement à lui-même, en entraînant le flotteur dans son mouvement. Comme le courant mobile est assez faible, on rend ses actions plus intenses en faisant faire au fil *bad* plusieurs tours, isolés les uns des autres comme dans le *multiplicateur*. On peut encore suspendre au flotteur, un petit couple à charbon, qui donne un courant beaucoup plus intense que le couple zinc-cuivre; le vase poreux est engagé par sa partie supérieure dans le disque de liége, de manière à présenter son ouverture en dessus. Il est alors facile d'y introduire l'acide nitrique et le cylindre de charbon.

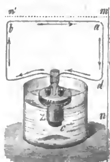


Fig. 1232.

1686. II. Actions des courants croisés. — *Quand deux courants se croisent, ils s'attirent quand ils marchent dans le même sens par rapport au point de croisement, et se repoussent dans le cas contraire.* Le point de croisement doit s'entendre d'un point quelconque de la perpendiculaire, commune aux courants. Soient *ab*, *cd* (*fig.* 1233) deux courants qui se croisent sans se rencontrer, et qui sont dirigés dans le sens des flèches. D'après l'énoncé, les parties *ao*, *co* qui marchent en même temps vers le point *o*, et les parties *bo*, *do* qui s'en éloignent aussi en même temps, s'attirent; tandis que les parties *od*, *oa*, et *ob*, *oc*, dont l'une s'éloigne du point *o* tandis que l'autre s'en approche, se repoussent. Si donc l'un des courants est mobile autour du point *o*, il tournera jusqu'à ce qu'il soit parallèle à l'autre et de même sens.



Fig. 1233.

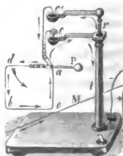


Fig. 1234 [1].

[1] Dans cette figure et dans celles qui suivent, les flèches empennées indiquent le sens dans lequel se déplacent certaines parties des appareils; les flèches simples continuent à indiquer le sens des courants.

Pour établir ce principe, on suspend par une pointe qui repose sur le fond d'une petite coupe remplie de mercure *c* (*fig.* 1234), un cadre en fil de cuivre, mobile autour d'une verticale qui passe par un de ses côtés *ao*, et équilibré par un contrepoids P. L'autre extrémité du fil de cuivre est recourbée en crochet et plonge dans une seconde coupe *c'*, sans en toucher les parois. Les deux couples communiquent avec les pôles d'une pile, au moyen du tube de métal *t* et de la colonne intérieure *r* qui ne touche pas les parois du tube. Le tube *t* et la colonne *r* communiquent par des bandes de cuivre avec des cavités remplies de mercure, ou avec des bornes qui reçoivent les fils de la pile. On tend au-dessous du côté *bo*, un fil M, dans lequel passe aussi un courant, de manière que ce fil ren-

Fig. 1235.

contre la verticale *oa*. Les courants en présence marchant dans le sens des flèches, l'angle *bon* se ferme, de manière à indiquer une attraction. Si l'on change le sens de l'un des courants, l'angle s'ouvre. On peut faire passer le courant de la même pile dans le fil M et dans le cadre *aobd*. On peut aussi disposer ce cadre sur un couple flottant, comme celui de la *fig.* 1232.

La *fig.* 1235 représente en coupe et en perspective, un autre système de courant mobile autour d'une de ses extrémités. Au milieu d'un vase métallique annulaire VV*uu* rempli d'eau acidulée, s'élève une colonne métallique *rc* surmontée d'une coupe pleine de mercure. Un fil de cuivre *cf* dont l'extrémité recourbée *f* plonge dans l'eau acidulée, peut pivoter sur une pointe reposant au fond de la coupe *c*; il est équilibré par une petite masse *p*. Les pôles d'une pile aboutissent à des bornes ou à des cavités pleines de mercure *a*, *b* qui communiquent par des bandes de cuivre, l'une, *a*, avec la colonne *rc*, l'autre *b*, avec le vase annulaire et l'eau acidulée qu'il contient; de manière que si l'électricité positive arrive en *a*, le courant marche de *c* en *f* dans le fil *cf*. En plaçant un autre courant rectiligne *mn* horizontalement au-dessus du point *c*, on vérifie le principe énoncé.

Fig. 1236.

Si l'on dispose au-dessus du milieu du côté horizontal *ba* (*fig.* 1232), un courant horizontal *mn'*; on voit le système flottant tourner sur lui-même jusqu'à ce que les courants horizontaux soient parallèles et de même sens.

On emploie encore, pour la dernière expérience, la disposition (*fig.* 1236) : deux rigoles demi-circulaires A et B sont creusées dans une table de bois et

sont séparées par des cloisons en bois *o*, *o'* ; elles contiennent du mercure que l'on fait communiquer avec les pôles de la pile. *ac* est une aiguille en cuivre dont les extrémités en fer se replient et plongent dans le mercure des rigoles. *r* est une seconde aiguille très légère suspendue par une chappe en agathe sur une pointe isolée placée au centre de l'appareil. Le courant se partage entre les deux aiguilles *ac* et *r*, et l'on voit celle qui est mobile tourner jusqu'à ce qu'elle soit parallèle à l'autre, et que les courants qui les parcourent soient de même sens.

1687. III. **Les parties consécutives d'un même courant se repoussent.** — Pour mettre ce principe en évidence, Ampère emploie un vase allongé en bois (*fig.* 1237), partagé, par une cloison isolante, en deux compartiments contenant du mercure. Sur ce liquide, flotte un gros fil de cuivre *ac*, recourbé en fer à cheval, de manière que la courbure *ac* puisse passer par dessus la cloison sans la toucher. Les branches parallèles de ce fil sont placées tout près des électrodes d'une pile, qui plongent dans le mercure ; de sorte que le courant passe d'un compartiment à l'autre par l'arc *ac*. Dès que le courant est établi, on voit le fil de cuivre s'éloigner vivement des extrémités des électrodes.



Fig. 1237.

MM. Van-Bréda et Logeman prouvent la répulsion dans le courant, par différents moyens ingénieux [1]. 1° On suspend au plateau d'une balance équilibrée, un fil de cuivre recourbé en U renversé, et dont les deux branches s'enfoncent dans le mercure de deux capsules qui reçoivent les réophores d'une pile. Le courant passe d'une capsule à l'autre à travers le fil recourbé, et ce fil est soulevé, puis il redescend par son poids, le courant étant interrompu dés qu'il a quitté le mercure ; il fait ainsi osciller la balance et constitue un *interrupteur* automatique, qui peut être utile dans certains cas. — 2° On suspend des boules de fer de 8 à 10^{mm} de diamètre, comme les billes d'ivoire dans l'expérience sur le choc (I, 476) ; les boules extrêmes communiquent avec des capsules pleines de mercure dans lesquelles plongent les réophores d'une pile. En employant 10 couples de Grove, on voit les boules extrêmes s'écarter de 1^{mm}, et l'on distingue entre les autres, des étincelles qui indiquent qu'elles ne sont plus en contact. — 3° Un courant qui passe par le point de contact de deux masses métalliques superposées, les fait vibrer, comme dans l'harmonica thermique (I, 488). Un bloc de cuivre de 3 kil. en forme de V très ouvert, peut vibrer ainsi sur une masse de plomb, sous l'influence du courant d'un seul couple de Grove.

M. Gore a fait une expérience curieuse qui semble se rattacher au même principe de répulsion : il pose sur deux rails circulaires communiquant avec les pôles de la pile, une balle métallique très légère ; cette balle est mise en mouvement par des répulsions exercées aux points d'appui, lesquelles ne sont pas égales, à cause du défaut de symétrie de la balle, comme dans l'expérience du planisphère électrique (1271).

[1] Cosmos, *Revue des sciences.*, t. XIII, p. 144.

Le principe qui nous occupe peut être regardé comme une conséquence du précédent; car chaque point d'un fil réophore peut être considéré comme le point de croisement de deux courants faisant entre eux un angle de 180°, et dirigés dans un sens opposé par rapport au sommet de cet angle ; ils doivent donc se repousser mutuellement.

Ampère expliquait par une répulsion semblable les mouvements du *moulinet* ou *tourniquet électrique* (1305), en admettant la continuation du courant électrique dans l'air. Mais ce milieu est mauvais conducteur; de plus, les courants formés par l'électricité due au frottement sont très faibles. L'explication que nous avons donnée, en parlant de ce petit appareil, nous semble donc bien préférable.

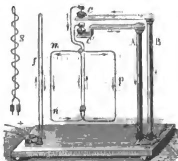


Fig 1238.

1688. IV. Actions des courants contraires. — *Deux courants contraires de même longueur faisant partie d'un même circuit, attirent et repoussent avec la même intensité.* Pour prouver ce principe, on présente parallèlement au côté *mn* d'un rectangle *pmn* parcouru par un courant (*fig.* 1238), un fil de cuivre replié sur lui-même, *f*, dans lequel passe aussi un courant. On trouve que ce système n'exerce aucune action sur le côté *mn*. L'attraction exercée par l'une des parties de *f* est donc égale à la répulsion exercée par l'autre.

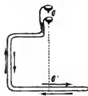


Fig. 1239.

Pour démontrer le même principe dans le cas des courants qui se croisent, on suspend dans les coupes c, c′, le circuit mobile (*fig.* 1239), et on le soumet à l'action d'un courant horizontal rencontrant le prolongement de l'axe de rotation *oo′* ; il n'y a pas d'effet produit.

Conséquence. — L'action d'un courant fini *ac* (*fig.* 1240), perpendiculaire à un plan qui le coupe par son milieu, est nulle sur une portion de courant *m* située dans ce plan. En effet, l'intensité des actions exercées par les deux moitiés *a* et *c* est la même, d'après ce que nous venons de voir, et ces actions sont contraires, le courant s'approchant du point de croisement dans la partie *a*, et s'en éloignant dans la partie *c*.

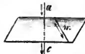


Fig. 1240.

1689. V. Courants sinueux. — *Un courant quelconque produit le même effet qu'un courant sinueux de même intensité, qui s'écarte très peu du premier par rapport aux distances auxquelles ils agissent.* Ce principe se démontre au moyen de l'appareil (*fig.* 1238), en remplaçant le double fil *f* par le double fil S, dont les parties sinueuse et recti-

ligne sont parcourues en sens contraire par le même courant : on constate qu'il n'y a aucun effet produit sur le courant mobile *mn*. On fait la même vérification pour les courants croisés, au moyen d'un système semblable à celui de la *fig*. 1239, mais dont une des deux parties très rapprochées est sinueuse.

Composition et décomposition des courants. — Il résulte du principe précédent qu'une petite portion rectiligne de courant *ab* (*fig*. 1241) peut être remplacée par deux autres *ac*, *cb* de même intensité terminées aux points *a* et *b*, ou par les parties égales *ac*, *ae*. D'où l'on voit qu'on peut appliquer aux courants la règle du parallélogramme des forces, pour les composer et les décomposer. On peut de même appliquer la règle du parallélipipède des forces. Il faut seulement remarquer que ce ne sont pas les forces des courants, qui sont composées ou décomposées ; mais ce sont les courants eux-mêmes qui sont remplacés par d'autres, de longueur convenable pour produire le même effet.



Fig. 1241.

Au moyen des cinq principes qui précèdent, on peut se rendre facilement compte de ce qui se passe quand on met deux courants en présence, dans des conditions données. Nous allons examiner quelques-unes de ces conséquences et montrer comment on les vérifie par l'expérience.

1690. Action d'un courant indéfini sur un courant fini perpendiculaire, et mobile parallèlement à lui-même. — Soit le courant fini *ab* (*fig*. 1242) dirigé vers le courant indéfini *mn*, et *oo'* la perpendiculaire commune à leurs deux directions. Le courant *ab* et la partie *om* du courant indéfini s'attirent, comme marchant en même temps vers le point de croisement. *ab* est, au contraire, repoussé par la partie *on* qui s'éloigne du point de croisement. Les deux actions appliquées en *c* sont égales et également inclinées par rapport à *ab* ; leur résultante *cr* est donc perpendiculaire à ce courant, et elle l'entraîne en sens contraire du courant *mn*. — Il serait facile de voir que, si le courant *ab* marchait de *b* en *a*, il se déplacerait parallèlement à lui-même dans le sens du courant *mn*.

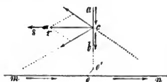


Fig. 1242.

Si le pied *o* de la perpendiculaire commune rencontre le courant fini *ab* au milieu de sa longueur, les actions sur les deux moitiés sont égales et contraires, et *ab* reste en équilibre. Si le point *o* ne tombe pas au milieu de *ab*, l'effet produit est dû à la différence des actions sur les deux parties de *ab*, et le mouvement a lieu dans le sens déterminé par la plus grande.

En vertu du principe de l'égalité de l'action et de la réaction, si le courant *ab* est fixe et le conducteur *mn* mobile dans le sens de sa longueur, ce dernier s'avancera dans le sens du courant qui le parcourt, si *ab* est dirigé vers le point de croisement, et en sens opposé dans le cas contraire.

Pour vérifier ces différentes conséquences, déduites par Ampère, on se sert

d'un appareil à vase annulaire V (*fig.* 1243), disposé comme celui de la *fig.* 1235, seulement la colonne centrale Cc (*fig.* 1243) est beaucoup plus haute. Dans la coupe *c* pivote, sur une pointe métallique, un balancier en bois supportant un fil vertical de cuivre *r*, dont une des extrémités plonge dans l'eau acidulée, tandis que l'autre communique avec la colonne Cc. Un courant horizontal *mn* étant approché de la partie inférieure du courant fini *r*, on voit ce dernier se mouvoir de manière à se porter du côté *m* s'il est descendant, comme dans la figure, et du côté *n*, s'il est ascendant.

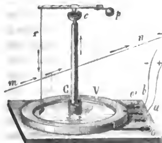


Fig. 1243.

Il résulte de là que : 1° dans un système de deux courants contraires AB, A'B, (*fig.* 1244) liés entre eux, mobiles autour de l'axe OO', et soumis à l'influence d'un courant indéfini perpendiculaire à cet axe, les actions sur AB et sur A'B' s'ajoutent, et le système prend une position d'équilibre stable dans laquelle le plan A'B' est parallèle au courant indéfini. 2° Si les deux courants sont de même sens, il y a équilibre quand leur plan est parallèle au courant indéfini ; et dans une position quelconque de leur plan, si ce dernier courant est à une distance infinie du système mobile.



Fig. 1244.

1691. Rotation d'un courant rectiligne fini, sous l'influence d'un courant rectiligne indéfini. — Soit *oa* (*fig.* 1245) un courant fini pouvant tourner dans un même plan autour du point *o*, vers lequel nous supposerons qu'il marche, et *mn* le courant indéfini. Le courant *ou* est attiré par la partie A*m*, qui s'éloigne comme lui du point de croisement A, et est repoussé par la partie *n*A ; il tournera donc dans le sens de la flèche *s*. Arrivé à la position *oc*, il est repoussé par le courant *mn*, auquel il est alors parallèle, passe au-dessus de *cc'*, par exemple en *oe*, où il est attiré par *n*E et repoussé par E*m* ; devient parallèle à *mn* en *oc'* où il est attiré, puis descend au-dessous de *cc'*, et est de nouveau sollicité de droite à gauche. *oa* tournera donc d'une manière continue, et en marchant dans le sens du courant *mn* dans ses positions les plus rapprochées de ce courant. Si on renversait le courant dans *ao*, la rotation changerait de sens. Dans les deux cas, le mouve-

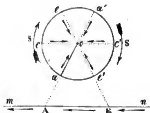


Fig. 1245.

ment s'accélère dans la demi-circonférence *c'ac*, parce que *ao* est alors plus près de *mn* ; il serait sensiblement uniforme, si *mn* était très éloigné de *oa*.

Quand le courant *mn* est assez rapproché du centre *o* pour que le point de croisement vienne tomber sur *oa* (*fig.* 1246), à partir de l'instant où cela a lieu, l'effet est dû à la différence des moments, par rapport à *o*, des forces qui agissent sur les deux parties du courant mobile. Si la distance de *mn* au point *o* est assez petite pour qu'il y ait deux positions *ao*, *a'o* pour lesquelles les deux moments soient égaux, il y a équilibre dans ces positions. Entre elles, le moment de la partie extérieure du courant mobile l'emporte sur celui de la partie comprise entre *mn* et *o*, l'équilibre est donc stable dans la position *ao* que le courant mobile rencontre la première, et instable pour la position *a'o*. Si le courant indéfini est en *m'n'*, à une distance telle que les deux positions d'équilibre se confondent en une seule *oc*, dans laquelle le courant mobile est perpendiculaire à *m'n'*, l'équilibre est stable pour les mouvements en arrière, et instable pour les mouvements en avant.

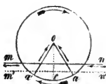


Fig. 1246.

Pour vérifier ces résultats, on se sert de l'appareil de la *fig.* 1235 ; on tend le courant indéfini, dans un plan horizontal peu éloigné de celui dans lequel se meut le courant mobile *cf*. On voit ce dernier tourner d'une manière continue, et dans le sens prévu, quand le courant en est suffisamment éloigné ; si l'on renverse le courant dans *cf*, le mouvement change de sens.

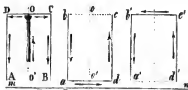


Fig. 1247.

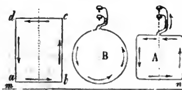


Fig. 1248.

1692. Action d'un courant horizontal indéfini, sur un système de courants horizontaux et verticaux. — 1° Soit d'abord le système ADCB (*fig.* 1247) de deux courants verticaux de même sens, et de deux courants horizontaux de sens contraire soumis à l'action d'un courant indéfini *mn* placé latéralement. Les deux courants verticaux tendent à diriger le plan du système, parallèlement à *mn* (1690). Les parties horizontales DO, OC tendent à le faire tourner dans le même sens d'une manière continue ; il pourra donc y avoir équilibre dans une position plus ou moins oblique du plan AC, ou mouvement continu de rotation, suivant les grandeurs relatives des parties horizontales et verticales. Si *mn* est à une très grande distance du système mobile, il y aura mouvement continu de rotation ; car les actions sur les parties

verticales s'entre-détruiront. — Tous ces résultats se vérifient en suspendant sur la coupe de la *fig.* 1243 un fil de cuivre plié comme ADCB (*fig.* 1247); le courant qui arrive par la colonne OO′ se partage entre les deux parties ODA, OCB.

2° Si, les courants verticaux étant de sens contraire, et les courants horizontaux, de même sens, comme en *badc* (*fig.* 1247), le courant *mn* rencontre l'axe *oo′*, ou en est à une distance plus grande que *o′a*, le système prend une position d'équilibre stable, dans laquelle le plan *ac* est parallèle à *mn*; les actions exercées sur les deux parties verticales et horizontales agissant dans le même sens. Dans le cas du système *a′b′c′d′*, les actions sur les parties horizontales et verticales se contrarient; le résultat dépendra donc de la longueur relative de ces parties.

3° Un courant rectangulaire fermé *abcd* (*fig.* 1248) soumis à l'action d'un courant indéfini *mn*, prend une position d'équilibre dans laquelle son plan est parallèle à *mn*, de manière que le courant qui s'approche de *mn* soit du côté par où arrive l'électricité positive en *mn*, ou, ce qui revient au même, que les courants soient de même sens dans la partie parallèle *ab*, la plus rapprochée de *mn*. Si le courant *mn* était auprès du côté *dc*, le plan *ac* tournerait de 180°. Si le courant *mn* était très éloigné, les actions sur les parties horizontales s'entre-détruiraient, et la position d'équilibre ne dépendrait que de celles qui s'exercent sur les parties verticales.

Tout cela s'applique à un circuit fermé *de forme quelconque*, car chaque élément oblique peut être remplacé par deux autres, l'un vertical, l'autre horizontal (1689).

Pour vérifier ces résultats, on suspend au support des *fig.* 1234 ou 1238, les circuits fermés A ou B (*fig.* 1248); on les voit se placer parallèlement à un courant horizontal très long qu'on en approche, de manière que les courants soient de même sens dans la partie la plus rapprochée.



Fig. 1249.

1693. Action d'un courant circulaire sur un courant fini perpendiculaire à son plan. — Soit *ac* (*fig.* 1249) un courant vertical fini mobile autour d'un axe parallèle *oo′* passant par le centre du courant circulaire horizontal *nam*. Si nous considérons les parties *m* et *n* les plus voisines de *ac* et le point de croisement *aa*, il est facile de reconnaître que la partie *n* attire le courant *ca*, comme s'approchant en même temps du point de croisement, tandis que la partie *m* le repousse. Le courant mobile tournera donc en sens contraire du courant circulaire; il tournerait dans le même sens, s'il allait de *a* en *c*. L'effet serait le même, si la distance *oa* était plus grande que le rayon du courant circulaire.

Ces résultats se vérifient au moyen de l'appareil de la *fig.* 1243. Après avoir enlevé le courant *mn*, on entoure le vase V, d'un ruban de cuivre enveloppé de soie, faisant plusieurs tours *mn* (*fig.* 1250), qu'on loge dans l'épaisseur des parois du vase V (*fig.* 1243), et dont les extrémités communiquent avec les

pôles de la pile, par les coupes à mercure *o*, *o'*. On a aussi coutume de substituer au courant unique *r* le double courant *fof'* (*fig.* 1250), dont les deux parties *f* et *f'* reçoivent l'impulsion dans le même sens. On voit le système mobile tourner d'un mouvement uniforme dans le sens prévu. On peut enfin employer une seule et même pile, pour faire passer l'électricité dans toutes les parties de l'appareil. Il suffit pour cela de joindre les coupes *o*, *a* et *b*, *o'* (*fig.* 1243), au quel cas le courant de la pile se partage entre le multiplicateur circulaire et le courant mobile; ou bien de joindre *bo'* et de plonger le fil négatif de la pile en *o*, de sorte que le courant passe du système mobile dans le multiplicateur circulaire.

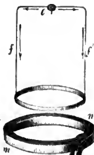


Fig. 1250.

Si l'axe de rotation ne passait pas par le centre du courant circulaire, le mouvement ne serait plus uniforme. Si le courant circulaire était extrêmement grand, et l'axe de rotation très près d'un de ses points, les parties les plus éloignées n'ayant pas d'action sensible sur le courant mobile, les parties les plus rapprochées agiraient sur lui comme un courant rectiligne indéfini.

1694. Actions mutuelles d'un courant circulaire et d'un courant fini pouvant tourner dans un plan parallèle. — Soit *oa* (*fig.* 1251) le courant fini pouvant tourner autour de son extrémité placée au centre du courant circulaire *mn*, et supposons que le courant marche dans le conducteur *oa*, du centre à la circonférence; ce conducteur sera attiré par la partie *n* du courant circulaire, et repoussé par la partie *m*; et comme il en est de même dans toutes ses positions, il tournera d'un mouvement uniforme en sens contraire du courant circulaire. Il tournerait dans le même sens s'il marchait de la circonférence au centre.



Fig 1251.

Ces résultats se vérifient au moyen de l'appareil de la *fig.* 1235; le courant *mn* étant supprimé, on entoure le vase annulaire, du multiplicateur circulaire de la *fig.* 1250, et le courant *of* (*fig.* 1235) tourne dans le sens prévu; ce sens change donc quand on renverse le courant dans *of*. Au lieu de *of*, on emploie de préférence le système mobile *coc'* (*fig.* 1251), dont les deux parties *oa* et *ob* reçoivent la même impulsion. Les parties verticales concourent bien aussi à l'effet produit, mais comme elles sont très courtes, leur influence est négligeable. Enfin, au moyen des quatre coupes de mercure *o*, *b*, *a*, *o'* (*fig.* 1235), on peut se servir d'une seule pile, comme dans l'expérience précédente (1693).

Si l'axe de rotation du courant mobile n'était pas au centre du cercle, le mouvement ne serait plus uniforme; et si l'extrémité *a* venait à dépasser ce cercle dans certaines positions, il pourrait y avoir équilibre, comme dans le cas

d'un courant indéfini (1689); car on voit que la partie du courant mobile placée en dehors du conducteur circulaire tend à marcher en sens contraire de celle qui est placée dans l'intérieur.

Rotation du courant circulaire. — Si le conducteur *ab* est fixe, et le conducteur circulaire, mobile autour de son centre, ce dernier tournera sur lui-même dans le sens même du courant qui le parcourt, quand le courant rectiligne sera dirigé du centre à la circonférence ; et en sens opposé, dans le cas contraire. Si le courant rectiligne était extérieur au courant circulaire, les mouvements de ce dernier se feraient contrairement à ce qui a lieu quand le courant rectiligne est intérieur. Pour vérifier ce dernier résultat, Savary suspend sur la colonne centrale du vase annulaire de la *fig.* 1253, la spirale plane *ab* (*fig.* 1252). Le courant arrivant par la colonne centrale, suit les spires, d'où il s'échappe pour

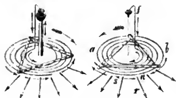


Fig. 1252.

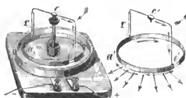


Fig. 1253.

se diriger vers les parois du vase annulaire. En chaque point, *n*, de la spirale, se croisent deux courants; l'un, *r*, relativement fixe et dirigé, dans le liquide, suivant le prolongement du rayon; l'autre, *s*, qui parcourt la spirale. Ces deux courants agissent l'un sur l'autre de manière à faire tourner celle-ci en sens contraire du courant qui la parcourt. Si l'on renverse le courant qui traverse l'appareil, la spirale continuera à tourner dans le même sens; car les deux courants qui agissent l'un sur l'autre en chacun de ses points seront l'un et l'autre renversés; seulement, le mouvement se trouvera alors de même sens que le courant dans la spirale, les courants qui traversent le liquide allant des parois du vase à la spirale, pour remonter par le fil *f*. Si la spirale *dextrorsum ab* était remplacée par la spirale *sinistrorsum* figurée à sa gauche, le mouvement aurait lieu en sens opposé.

Ampère obtient la rotation d'un courant circulaire, au moyen de l'un des systèmes *aco*, *a'c'o'*, (*fig.* 1253) qu'il suspend sur la colonne du vase annulaire. *r*, *r* est une lame de bois, et *o*,*o'*, une bande d'ivoire. On voit que *a'c'e'* se comportera comme la spirale *dextrorsum*, et *aco*, comme la spirale *sinistrorsum*; car le courant, quand il arrive par la colonne, parcourt le cercle *a'o'*, de *o'* en *a'*, et le cercle *ao* de *a* en *o*, pour s'en échapper par tous les points, en rayonnant à travers le liquide. Le sens de la rotation est indépendant de celui du courant, comme pour les spirales.

1695. Action d'un courant circulaire sur un système de courants

perpendiculaires et parallèles à son plan. — Si nous considérons d'abord le système *abcd* (*fig.* 1254) mobile autour d'un axe *oo'* qui passe par le centre du courant circulaire, il est facile de voir que les actions sur les quatre parties *ab*, *cd*, *oc*, *ob* s'ajoutent pour produire le mouvement de rotation. Si les deux parties *abo*, *ocd* étaient la continuation du même courant, le système serait évidemment astatique.

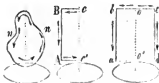


Fig. 1254.

Cas d'équilibre. — Considérons le conducteur c'ABc terminé à l'axe *cc'* passant par le centre du courant circulaire ; les actions sur cB et sur BA tendent à faire tourner le système dans un sens, et l'action sur c'A, dans le sens opposé ; et comme cette dernière action s'exerce à une moindre distance, on ne peut prévoir le résultat. L'expérience montre que l'effet est nul, quel que soit le point où le plan du courant circulaire coupe AB. Le résultat est le même, quand, au lieu d'un conducteur composé de parties rectilignes, on a un conducteur de forme quelconque ayant ses extrémités sur l'axe *cc'*, chaque élément oblique pouvant être remplacé par deux autres, l'un parallèle, l'autre perpendiculaire à l'axe (1689).

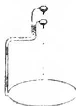


Fig. 1255.

Si le courant mobile se continue de l'autre côté de l'axe, comme en *nn*, l'action sur chaque partie étant nulle, l'ensemble restera en équilibre. On peut donc dire que : *un courant fermé de forme quelconque et mobile autour d'un axe qui le coupe en deux points, ne reçoit aucune action d'un courant circulaire perpendiculaire à cet axe supposé passer par son centre.* Réciproquement, si le courant fermé est fixe, il n'a aucune action sur un courant circulaire ou sur une partie de courant circulaire mobile autour de son axe.

Pour constater ces résultats, on place au-dessous du système mobile A de la *fig.* 1248, le multiplicateur circulaire de la *fig.* 1250, en ayant soin que son centre coïncide avec l'axe de rotation du circuit mobile. Pour vérifier la réciproque, on suspend sur deux coupes, le circuit circulaire (*fig.* 1255) mobile autour d'un axe qui passe par son centre, et l'on fixe au-dessous ou au-dessus, un circuit fermé tel que A (*fig.* 1248), de manière qu'il soit coupé en deux points par l'axe de rotation du circuit circulaire, dont les parties rectilignes se neutralisent mutuellement.

II. Des lois mathématiques des phénomènes électro-dynamiques.

1696. Les actions de deux parties finies de courant sont les résultantes de toutes les actions mutuelles des éléments infiniment petits qui les composent.

Après avoir étudié, dans les divers cas, les phénomènes produits par les courants finis, Ampère a cherché les lois des actions de deux éléments infiniment petits, lois relatives à leur distance et à l'angle qu'ils font entre eux. Une fois ces lois établies, il s'en est servi pour obtenir, par les méthodes du calcul intégral, les effets résultants produits par les courants finis, afin de retrouver les résultats donnés par l'expérience et même d'en prédire de nouveaux. Comme on ne peut expérimenter avec des courants infiniment petits, il a fallu conclure les lois des actions exercées entre ces éléments, des effets observés sur des courants finis placés dans des conditions déterminées. Pour cela, on peut procéder en cherchant, par des essais successifs, quelles sont les lois qu'il faut supposer présider aux actions entre deux éléments, pour qu'on puisse en déduire par le calcul l'effet résultant donné par l'expérience, considéré tant dans sa direction que dans son intensité. Mais cette méthode générale, longue et pénible, exige que l'on fasse des mesures d'intensité, travail dans lequel on rencontre une foule de difficultés pratiques. Ampère a suivi une autre marche, en partant de certains cas d'équilibre donnés par l'observation [1]. Parmi les principes d'expérience sur lesquels il s'est appuyé, nous rappellerons les actions des courants sinueux, qui conduisent à la décomposition des courants rectilignes, et ce fait général que, si l'on change en même temps le sens de deux courants qui agissent l'un sur l'autre, les effets restent les mêmes.

1697. Direction de la force résultant des actions mutuelles de deux éléments de courant. — Les courants finis agissant les uns sur les autres par attraction ou répulsion, il doit en être de même des éléments infiniment petits qui les composent. Nous allons montrer que ces actions sont dirigées suivant la droite qui joint les milieux de deux éléments.

Considérons deux courants infiniment petits non situés dans le même plan *mn*, *m'n'* (*fig.* 1256), et soit *oo'* la ligne qui joint leurs milieux ; ce que nous allons dire des moitiés *on*, *o'n'* s'appliquera aux éléments entiers *mn*, *m'n'*. L'élément *on* peut être remplacé par deux autres *oa*, *ob* capables de produire les mêmes effets (1689). L'élément *o'n'* peut être remplacé d'abord par deux autres, *o'b'*, *o'c*, dont le dernier, *o'c*, est perpendiculaire à *oo'* dans le plan *n'o'b'*. Ce dernier, *o'c*. peut être lui-même remplacé par *o'a'* parallèle à *oa*, et *o'r* perpendiculaire à *o'a'*. De sorte que l'élément *o'n'* est remplacé par les trois éléments *o'a'*, *o'b'*, *o'r*, qui sont les arêtes d'un parallélipipède rectangle dont *o'n'* est la diagonale. Au lieu des éléments *mn*, *m'n'*, nous en avons donc cinq autres, deux en *o* et trois en *o'*, et il faut examiner les actions des deux premiers sur les trois autres. Or, les actions de 2*ob* sur 2*o'a'* et sur 2*o'r*, et de 2*oa* sur 2*o'r* et sur 2*o'b'*, sont nulles ; car l'un de ces éléments est perpendiculaire par son milieu au plan dans lequel se trouve l'autre (1688). Il n'y a donc d'action qu'entre les éléments *oa*, *o'a'* qui sont parallèles, et *ob*, *o'b'* qui sont

[1] *Mém. de l'Ac. des sc.* de Paris, t. VI, p. 175 ; et *Ann. de ch. et de ph.*, 2e sér., t. XX, p. 398, et XXIX, p. 381.

dirigés suivant la même ligne droite. Les actions de deux éléments de courants peuvent donc être remplacées par celles de deux éléments parallèles et de deux autres placés sur la même ligne droite.

Il suffit donc, pour démontrer que les actions de deux éléments sont dirigées suivant la droite qui joint leurs milieux, de le prouver pour le cas d'éléments parallèles et d'éléments placés sur la même droite. Dans le premier cas, supposons que la force résultant de l'action des courants parallèles, tels que *oa*, *o'a'* (*fig.* 1256), ait une direction AR différente de *oo'*, et décomposons cette force en deux autres, l'une A*e*, perpendiculaire à *oo'*; l'autre A*d* suivant *oo'*. La première composante sera nécessairement nulle; car, si nous faisons tourner tout le système, de 180° autour de *oo'*, les courants *oa*, *o'a'* changeront de sens en même temps, et AR, venant en AR', et A*e* en A*e'*, l'effet des deux courants *oa*, *o'a'* serait modifié; ce qui ne peut être, d'après ce que nous venons de rappeler (1696). Il faut donc que la composante A*e* soit nulle, et par conséquent que AR se confonde avec *oo'*. Dans le cas des courants tels que *ob*, *o'b'*, si la force résultant de leur action était dirigée suivant AR différent de *oo'*, en faisant tourner le système autour de cette dernière droite, AR décrira un cône dont toutes les arêtes conviendront également à la direction de l'action des deux courants; cette action aurait donc une infinité de directions, et nous ne pourrons échapper à cette conséquence qu'en supposant que AR se confond avec *oo'*.

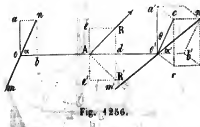


Fig. 1256.

1698. Expression de l'intensité d'action de deux courants élémentaires. — Soit ds, ds' les longueurs des éléments *oa*, *o'a'* (*fig.* 1256), i, i' les intensités des courants dont ils font partie, α, α' les angles que font les moitiés des éléments vers lesquelles marchent les courants, avec la partie de *oo'* qui est à la droite des sommets *o*, *o'* de ces angles. Soit enfin θ l'angle *a'o'c* des deux plans passant par *oo'* et contenant ces éléments. Les seules composantes dont les actions mutuelles ne soient pas nulles sont, comme nous venons de le voir, *ob*, *o'b'* et *oa*, *o'a'*.

Les premières ont pour valeur $\overline{ob} = i . ds \cos\alpha$; $\overline{o'b'} = i' . ds' \cos\alpha'$; et les deux autres $\overline{oa} = i . ds \sin\alpha$; $\overline{o'a'} = i' . \overline{o'c} \cos\theta = i' . ds' \sin\alpha' \cos\theta$. Les deux dernières étant parallèles entre elles, leur action mutuelle ne dépendra que de leur distance, de leurs longueurs et de leurs intensités; et comme nous voyons toujours les forces de la nature varier en raison inverse d'une puissance de la distance, et que l'action est ici évidemment proportionnelle au produit des intensités [1] et au produit des longueurs des éléments, cette action sera repré-

[1] Nous verrons plus loin comment ce point a été vérifié par l'expérience (1700).

sentée par $\frac{ii'dsds'}{r^n}$ sin α sin α' cos θ; r étant la distance oo'. De même l'action des éléments ob, $o'b'$ sera proportionnelle à $\frac{ii'dsds'}{r^n}$ cos α cos α'. L'action totale serait donc la somme de ces quantités, si les courants oa et $o'a'$, ob et $o'b'$ étaient dans les mêmes conditions : mais les deux premiers étant parallèles, et les deux autres sur une même ligne droite, on ne peut supposer qu'ils agissent avec la même efficacité. Si donc k représente le rapport entre les intensités de leurs actions, l'intensité I des actions réunies de mn et $m'n'$ sera

$$\mathrm{I} = \frac{ii'dsds'}{r^n}(\sin\alpha\sin\alpha'\cos\theta + k\cos\alpha\cos\alpha'), \quad [1]$$

expression dans laquelle il reste à déterminer les valeurs de n et de k.

Détermination des constantes. — Pour déterminer les constantes n et k, Ampère s'est appuyé sur deux cas d'équilibre. Le premier, déjà indiqué (1695), consiste en ce qu'un courant circulaire n'a pas d'action sur un courant mobile autour d'un axe perpendiculaire à son plan et passant par son centre, quand les extrémités du courant mobile aboutissent à cet axe.

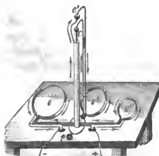


Fig. 1257.

Voici le second cas d'équilibre : deux courants circulaires de même intensité, de même sens et situés dans le même plan, n'ont pas d'action sur un troisième courant circulaire aussi de même sens et placé dans le même plan entre les deux premiers, quand les centres sont en ligne droite et à des distances respectivement proportionnelles aux rayons des cercles. Pour prouver ce cas d'équilibre, Ampère a employé l'appareil de la *fig.* 1257 ; o, o'' sont deux conducteurs circulaires fixes, et o' un courant circulaire placé dans le même plan que les deux autres et mobile autour de l'axe cc' qui ne passe pas par son centre, p est un contrepoids. Les flèches indiquent la marche que suit un même courant dans les trois circuits. On trouve qu'il y a équilibre quand les distances des centres o, o', o'' sont telles que l'on ait $o'o : o'o'' = \frac{r}{r'} : \frac{r'}{r''}$; r, r', r'' étant les rayons des cercles.

Ampère, se servant d'abord du premier cas d'équilibre, a calculé, en partant de la formule [1], la somme algébrique de toutes les actions des différents éléments du courant circulaire sur les éléments du courant terminé à l'axe du cercle, et comme il y a équilibre, il a écrit que cette somme est nulle, ce qui lui a donné une première équation de condition, qui est $n + 2k - 1 = 0$. Un calcul semblable appliqué au second cas d'équilibre, l'a conduit à une seconde équation de condition, qui lui a donné $n = 2$. Portant cette valeur dans

$n+2k-1=0$, on en conclut $k=-\frac{1}{2}$, et la formule qui exprime les actions mutuelles de deux éléments de courant, devient

$$I=\frac{ii'dsds'}{r^2}\ (\sin\alpha\sin\alpha'\cos\theta-\tfrac{1}{2}\cos\alpha\cos\alpha')\,, \qquad [2]$$

qui montre que *l'action de deux éléments de courants varie en raison inverse du carré de la distance*. Quand I est positif il y a attraction, et quand il est négatif, répulsion.

Si les deux courants sont dirigés dans le même sens suivant la même ligne droite, il faut faire $\alpha=\alpha'=0$, et il vient $I=-\frac{ii'dsds'}{2r^2}$. Cette valeur étant négative, il y a répulsion ; d'où l'on voit que les parties consécutives d'un même courant se repoussent (1687).

1699. Remarques. — Résultats du calcul. — Ce n'est pas du premier coup qu'Ampère a déterminé les constantes comme nous venons de l'expliquer. Dans le principe, il admettait comme évident que l'action variait en raison inverse du carré de la distance, en se basant principalement sur ce que l'action d'un élément de courant sur un élément magnétique suit précisément cette loi (1660). Plus tard, avec Savary, il trouva une seconde relation, en s'appuyant sur ce fait qu'un circuit formant un grand nombre de spires égales autour d'un anneau en bois, n'a aucune action sur un courant mobile quelconque. Savary ayant calculé la somme des actions des éléments d'un pareil système, au moyen de la formule [2], trouva que, pour que cette somme soit nulle généralement, il faut que l'on ait $kn+1=0$.

Dans la méthode suivie par Ampère, on admet *à priori* que l'action de deux éléments de courant varie en raison inverse d'une certaine puissance n de la distance, et qu'il y a un rapport constant k entre l'intensité des actions de deux éléments parallèles et celle de deux éléments en ligne droite. L'accord entre les résultats calculés au moyen de la formule et ceux de l'expérience, prouve *à posteriori* que ces deux suppositions sont légitimes. Du reste, M. Masson a, depuis, retrouvé l'expression [2] sans rien supposer sur sa forme, en partant de la formule générale

$$ii'dsds'\ \{f(r)\cos\alpha\cos\alpha'+F(r)\sin\alpha\sin\alpha'\cos\theta\},$$

dans laquelle il a déterminé la forme des fonctions f et F au moyen de deux cas d'équilibre [1].

Une fois trouvée l'expression de l'action de deux éléments de courants, Ampère, Savary, de Montferrant [2], Masson,.... ont déterminé par le calcul la nature, la direction et l'intensité d'action de deux courants placés dans des conditions données. La question est alors purement mathématique et ne pré-

[1] *Théorie des phénomènes électro-dynamiques et du magnétisme* (1838), p. 9.

[2] *Manuel d'électricité dynamique* (1823).

sente d'autres difficultés que celles qui résultent, dans certains cas, de l'insuffisance des méthodes analytiques. Les résultats obtenus ont toujours été d'accord avec ceux de l'expérience, quand celle-ci a pu être faite. Voici quelques lois importantes obtenues par cette méthode :

1° L'action d'un courant rectiligne indéfini dans les deux sens, sur un petit courant rectiligne placé d'une manière quelconque dans l'espace, est perpendiculaire à ce dernier.

2° L'action d'un courant indéfini sur un courant rectiligne parallèle, *varie en raison inverse de la simple distance*, comme pour l'action d'un courant indéfini sur un élément magnétique (1660). Il résulte de là qu'un courant indéfini *nn* (*fig.* 1258) n'a pas d'action sur deux courants finis *oao*, *cbc* de même intensité, qui lui sont parallèles et sont fixés à un même axe *oo*, quand le conducteur *nn* se trouve à des distances des parties parallèles à l'axe, réciproquement proportionnelles aux longueurs de ces parties. C'est, en effet, ce que l'expérience montre. Les actions du courant indéfini sur les parties horizontales s'entre-détruisent, parce que ces parties sont de sens contraire et de même longueur. On s'est aussi servi de ce cas d'équilibre pour déterminer les constantes.



Fig. 1258.

3° Les actions de deux courants parallèles de longueur égale sont exprimées par la formule $f = \frac{ii'l^2}{rd}$; *d* étant la diagonale du rectangle qu'ils forment quand on réunit leurs extrémités deux à deux, *l* leur longueur et *r* leur distance.

4° Un courant fermé ne peut imprimer un mouvement de rotation continu à un autre courant fermé mobile autour d'un axe.

1700. Expériences de M. Weber. — Les expériences de vérification faites par Ampère et par les physiciens qui l'ont suivi, n'ont porté que sur la nature et le sens des actions prédites par le calcul. Les résultats relatifs aux intensités n'avaient pas été vérifiés, à cause des difficultés que présentent les mesures d'intensité. M. Weber, en 1848, est parvenu à combler cette lacune, au moyen d'un instrument très délicat, auquel il a donné le nom de *dynamomètre électro-dynamique*. Cet appareil ressemble beaucoup au magnétomètre électrique du même physicien (1613) (*fig.* 1189). Le multiplicateur est circulaire, et composé de 300^m de fil formant 900 tours. L'aimant mobile est remplacé par un autre multiplicateur circulaire, formé de 200^m de fil formant 1200 tours, et suspendu dans l'intérieur du premier par deux fils d'argent parallèles très rapprochés, de 50^{cm} de longueur. C'est par ces fils que le courant est introduit dans ce multiplicateur mobile, dont le centre coïncide avec celui du multiplicateur fixe, et qui tend toujours à se placer dans le même plan que ce dernier, de manière que les courants marchent dans le même sens. Si le multiplicateur mobile est dérangé de cette position, il tend à y revenir avec une force qui est mesurée par le sinus de l'angle de torsion du système bifilaire

(1247). Parmi les résultats observés par M. Weber, nous citerons le suivant : l'action réciproque des deux multiplicateurs circulaires est proportionnelle au carré de l'intensité d'un même courant qui passe de l'un à l'autre ; ce qui justifie Ampère d'avoir admis que l'intensité des actions mutuelles de deux éléments de courant était proportionnelle au produit de leurs intensités (1698).

1701. De l'explication des actions électro-dynamiques. — On a cherché à rattacher les actions mutuelles des courants, aux attractions et répulsions électriques ordinaires. P. Prévost, dès l'année 1822, faisait les premières tentatives à ce sujet [1]. Il considérait un courant comme composé de deux courants simples marchant en sens contraire dans le même conducteur, l'un formé de fluide positif, l'autre de fluide négatif. Il admettait ensuite que les électricités en mouvement dans deux conducteurs voisins s'attirent ou se repoussent comme dans l'état statique, et que les actions sont bien plus vives lorsque les fluides se meuvent en sens contraire, c'est-à-dire sont en mouvement relatif, que lorsqu'ils marchent dans le même sens dans les deux conducteurs, ou sont en repos relatif. Comme il y a deux courants simples dans chacun des deux courants ordinaires, il y a quatre actions s'exerçant soit entre des courants de même fluide, soit entre des courants de fluides contraires. Si les courants composés sont de même sens, les courants simples de même nom sont en repos relatif, et se repoussent moins fortement que les courants simples de sens contraire ne s'attirent, et il y a attraction entre les deux conducteurs. C'est l'inverse quand les courants composés sont en sens contraire.

M. Weber a développé les idées de P. Prévost, et leur a donné une forme plus précise, en considérant les courants comme formés par des décharges particulaires (1599) ; il a appliqué le calcul aux quatre actions produites entre deux éléments de courant, par les courants simples qui les composent, et il a trouvé pour expression de la résultante de ces actions, la formule qu'Ampère avait déduite de quelques expériences fondamentales. Cette concordance est bien faite pour donner quelque confiance en cette théorie ; mais elle est présentée au moyen de calculs trop élevés pour être exposés ici.

III. Actions des aimants et de la terre sur les courants.

1702. Actions des aimants sur les courants. — Le principe de l'égalité entre l'action et la réaction conduit à admettre que, si les courants agissent sur les aimants, réciproquement les aimants doivent agir sur les courants. C'est, en effet, ce qui a lieu : vient-on à placer un aimant horizontal au-dessus du conducteur mobile *cf* de l'appareil (*fig.* 1235), ou de l'aiguille *r* de l'appareil (*fig.* 1236), après avoir enlevé le courant indéfini *mn* ou le conducteur fixe *ac*, on voit le conducteur mobile *cf* ou *r* se mettre en croix avec l'aimant, de

[1] *Bibliothèque universelle de Genève*, t. XXI (1822), p. 178.

manière que le pôle nord de ce dernier se trouve à la gauche du courant. On peut encore placer l'aimant horizontalement au-dessous du point milieu des circuits mobiles A ou B (*fig.* 1248), ou en M (*fig.* 1259), au-dessus du côté *mn* du circuit flottant *mnrp*, ou bien enfin dans l'intérieur de ces circuits, et on les voit toujours se placer de manière que leur plan soit perpendiculaire à l'aimant, et que le pôle austral de ce dernier soit à la gauche de chaque partie du courant.

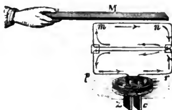


Fig. 1259.

Enfin, de même qu'un courant fermé déplace une aiguille aimantée dans le sens de sa longueur, de même un aimant introduit perpendiculairement dans l'intérieur d'un anneau électrique flottant, l'entraîne parallèlement à lui-même dans les positions d'équilibre que nous avons signalées (1662). Si le pôle nord est à la droite du courant, l'équilibre est instable quand l'anneau se trouve au milieu de l'aimant; on le voit alors s'approcher d'un des pôles, le dépasser, puis tourner sur lui-même de 180°, de manière que le pôle nord de l'aimant soit à la gauche du courant; l'anneau est ensuite attiré, revient vivement au milieu du barreau où il finit par s'arrêter dans une position d'équilibre stable. Tous ces mouvements, étudiés avec soin par G. de La Rive, s'expliquent facilement par la tendance du courant à se tourner de manière que le pôle nord de l'aimant soit à sa gauche.

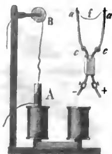


Fig. 1260.

Nous avons vu que les circuits agissent sur les parcelles de fer doux, et tendent à les placer transversalement à leur direction. M. Leroux a imaginé des expériences ingénieuses dans lesquelles, réciproquement, on déplace un courant au moyen du fer doux. 1° Un fil de platine très fin et très flexible *f* (*fig.* 1260) est suspendu entre deux tiges *ac*, *ac*, articulées en *c*, *c* et communiquant avec les pôles d'une pile à charbon d'une quinzaine de couples. Le fil est engagé en *a*, *a* dans de petits trous percés dans des lamelles de platine, de manière qu'il puisse tourner sans se tordre. Quand il est en platine, il rougit et ses mouvements sont plus faciles à distinguer. Si on lui présente le pôle d'un aimant, on le voit prendre des courbures variables, suivant la position de l'aimant et le sens du courant. Si l'on approche une masse de fer doux, le fil se précipite à sa surface et y reste appliqué. — 2° A un cylindre de fer doux, (A *fig.* 1260), placé sur le pôle d'un électro-aimant, est attaché un fil d'argent dont on tient l'autre extrémité

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LIX, p. 409.

à la main, et qui est parcouru par un courant. Quand l'électro-aimant est en activité, le fil, qui tend à se placer transversalement au cylindre A, s'enroule tout autour, en formant une hélice ayant le sens qu'elle devrait avoir pour lui donner l'aimantation qu'il possède. On peut enrouler le fil sur une bobine B qui communique avec l'un des pôles de la pile.

Nous avons vu que l'arc voltaïque change de forme sous l'influence d'un aimant (1535); c'est qu'on peut le considérer comme formé d'une multitude de courants d'une flexibilité parfaite, se comportant comme le fil *f*. M. Plucker a étudié, à ce point de vue, les actions des aimants sur l'arc voltaïque; nous reviendrons sur ce sujet, en parlant de la production de l'arc au moyen des appareils d'induction.

La terre ayant, comme nous l'avons vu, toutes les propriétés d'un aimant, il était naturel de penser qu'elle devait avoir une action sur les courants mobiles. C'est, en effet, ce que Ampère a découvert, en 1820, dans le cours de ses premières recherches sur les actions mutuelles des courants [1].

1703. Action de la terre sur un courant fermé. — Un circuit fermé mobile autour d'un axe vertical, se tourne spontanément dans une direction perpendiculaire au méridien magnétique, de manière que le courant marche de l'Est à l'Ouest dans sa partie inférieure. Ce résultat se prouve facilement au moyen du flotteur de G. de La Rive (*fig.* 1261), dont le fil fait plusieurs tours, afin d'augmenter l'effet. On emploie encore le système *af* (*fig.* 1262) qui peut tourner librement autour d'un axe vertical, et dans lequel le courant arrive par le fil *f* plongeant dans une coupe pleine de mercure dont il ne touche pas le fond, et sort par la colonne *a* et le fil *f'*. On voit toujours le circuit mobile se placer perpendiculairement au méridien magnétique, de manière que le courant marche de l'Est à l'Ouest dans sa partie inférieure. Une légère aiguille en bois perpendiculaire au plan du circuit, *sn* (*fig.* 1261), prendra donc la direction de l'aiguille de *déclinaison*.

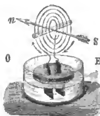


Fig. 1261.

Ampère a aussi reproduit, par l'expérience, le phénomène de l'*inclinaison* de l'aiguillle aimantée : un circuit plan de forme quelconque (*fig.* 1263) est mobile autour de l'axe *oo'* qui passe par son centre de gravité, et que l'on dirige perpendiculairement au méridien magnétique. Le courant, arrivant, par exemple, par la colonne de droite, entre par la partie *o'* de l'axe, dans le circuit mobile, qu'il parcourt, et retourne à la pile par *c'co* et par la colonne de gauche. En *c* et *c'* les parties qui se croisent sont séparées par des lames de bois. Dès que le courant est établi, le circuit mobile s'incline de manière que la flèche BA, perpendiculaire à son plan, soit parallèle à l'aiguille d'inclinaison.

1704. Courants astatiques. — L'action de la terre intervient dans la

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XV, p. 188.

plupart des expériences d'électro-dynamique. Pour n'être pas induit en erreur par l'intervention de cette cause, on a soin de répéter une seconde fois chaque expérience, en renversant le courant fixe, de manière à changer le sens de l'action. Quand on emploie des courants fermés, on les dispose de manière que l'action de la terre sur l'une des moitiés soit contrebalancée par son action inverse sur l'autre moitié, comme dans la *fig.* 1264, où les parties égales A et B dans lesquelles le courant circule en sens contraire, tendent à se placer d'une manière opposée, sous l'influence terrestre. On formerait un autre systéme astatique en suspendant les deux cercles A et B dans une position horizontale, par le milieu de la partie qui les réunit. Les circuits mobiles des *fig.* 1238 et 1259 forment aussi des systémes astatiques.

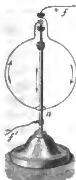


Fig. 1262.

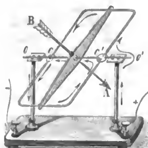


Fig. 1263.



Fig. 1264.

1705. COURANTS TERRESTRES. — Ampére ayant rapproché le phénoméne de la direction d'un circuit fermé par la terre, de l'action que produit sur le même circuit un courant indéfini (1692), expliqua l'action terrestre en admettant qu'il existe dans le globe, un systéme de courants électriques parallèles à l'équateur magnétique, et marchant de l'Est à l'Ouest. En effet, de semblables courants auraient pour effet de placer le circuit fermé parallèlement à leur direction commune, et de manière que le courant marchât de l'Est à l'Ouest dans la partie inférieure du circuit. Nous avons vu aussi que l'effet ne provient que des actions exercées sur les parties verticales, celles qui s'exercent sur les parties horizontales s'entre-détruisant.

Il est facile de concevoir un seul courant qui produirait les mêmes effets que le système que nous venons de supposer. Ce courant résultant doit être parallèle au plan d'un courant fermé mobile autour d'un axe perpendiculaire au méridien magnétique (*fig.* 1263), c'est-à-dire que le courant résultant doit être perpendiculaire à l'aiguille d'inclinaison. Pour qu'il en soit ainsi dans tous les points de la surface du globe, il faut que le courant résultant soit trés rapproché du centre de la terre.

L'hypothèse du courant terrestre rend facilement compte de la direction de l'aiguille aimantée, car un semblable courant doit la tourner de manière que le pôle austral soit à sa gauche ; ce qui a lieu, en effet, le nord étant à la gauche d'un courant qui marcherait de l'Est à l'Ouest. Il n'est donc plus nécessaire, pour expliquer les actions magnétiques du globe, de le considérer comme un aimant. Mais, pour que la nouvelle hypothèse mérite d'être admise, il faut que le courant terrestre produise tous les effets dont est capable un courant placé dans les mêmes conditions ; c'est ce que nous allons examiner.

1706. Action de la terre sur un courant vertical. — Si la terre agit comme un courant indéfini marchant de l'Est à l'Ouest, un courant vertical mobile autour d'un axe vertical doit se porter à l'Est s'il est descendant, et à l'Ouest s'il est ascendant (1690). Pour vérifier cette conséquence, on se sert de l'appareil (*fig.* 1265). VV, *vv* sont deux vases annulaires contenant de l'eau acidulée dans laquelle plongent les extrémités d'un fil de cuivre vertical *acb*, plié de manière qu'il n'y ait pas de partie horizontale. Le courant est introduit en *n*, suit une tige de cuivre passant dans l'axe d'un tube de verre qui sert de support au vase *vv*, se rend dans l'eau acidulée de ce dernier vase par les languettes *r*, *r*, et de là, par le fil *acb*, dans l'eau acidulée du vase VV, qui communique par la coupe *n'* avec l'autre pôle de la pile. Le courant descendant dans le fil mobile, on voit ce fil se porter à l'Est ; si l'on renverse ce courant, le fil se porte à l'Ouest. A l'équateur magnétique, l'action est maximum ; au pôle magnétique, ou près de ce pôle, l'équipage mobile serait soumis à l'action d'un courant circulaire sensiblement perpendiculaire à son axe, et tournerait d'une manière continue de l'Ouest à l'Est par le Sud, s'il était descendant. — S'il y a deux courants de même sens, *cb*, *db'*, le système est astatique, si les deux fils sont symétriquement placés et bien identiques, de manière que le courant se partage exactement entre eux. On rend cette condition plus facile à remplir en réunissant leur extrémité inférieure dans l'eau du vase VV, par un cercle en cuivre mince.

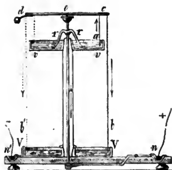
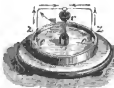


Fig. 1265.

1707. Rotation d'un courant horizontal par la terre. — On emploie l'appareil qui sert à produire la rotation d'un courant fini par un courant indéfini (1691); seulement on supprime ce dernier, qui est remplacé par le courant terrestre. Quand on opère dans l'hémisphère nord, on voit le système mobile tourner d'un mouvement uniforme de l'Est à l'Ouest en passant par le Sud, si le courant mobile va de la circonférence au centre ; et de l'Ouest à l'Est, quand il va du centre à la circonférence.

La *fig.* 1266 représente un appareil, imaginé par M. Faraday, qui fournit lui-même le courant qui doit prendre un mouvement de rotation. *zz* est un vase *en zinc* rempli d'eau acidulée. Au centre de ce vase s'élève une colonne en cuivre *r* surmontée d'une coupe à mercure dans laquelle pivote le conducteur mobile *crc*, dont les parties verticales sont réunies dans l'eau acidulée par un cercle léger en cuivre. Le zinc attaqué par l'acide prend l'électricité négative, et le liquide, le fluide positif, qui monte par les fils *cc*, et retourne au zinc par la colonne *r*. Avec cet appareil, la rotation se fait de l'Est à l'Ouest par le Sud. Au lieu d'un vase de zinc, on peut employer simplement un anneau de zinc supportant la colonne centrale par l'intermédiaire d'une traverse diamétrale, et qu'on plonge dans un vase quelconque rempli d'eau acidulée.


Fig. 1266.

Près du pôle magnétique de la terre, la vitesse de rotation doit être maximum ; là, le courant terrestre agit, comme un courant circulaire sur un courant parallèle à son plan (1694) ; à l'équateur magnétique, il y aurait équilibre dans toutes les positions, si les deux parties du courant mobile étaient égales. Il serait très intéressant de vérifier ces conséquences, ainsi que la rotation d'un courant vertical dans le voisinage du pôle. Les voyageurs qui passent la ligne, et ceux qui vont à la baie d'Hudson, où se trouve le pôle magnétique nord, pourraient facilement faire ces expériences.

C'est Ampère qui a constaté le premier la rotation d'un courant par la terre ; il attribua d'abord ce résultat aux actions exercées sur les parties verticales du conducteur mobile. M. de La Rive et M. Pouillet, chacun de leur côté [1], ont analysé le phénomène, et séparé les actions exercées sur les parties horizontales et sur les parties verticales.

1708. Transport d'un courant par la terre. — Enfin, si le globe est enveloppé par un système de courants marchant de l'Est à l'Ouest dans le voisinage de l'équateur magnétique, un courant parallèle à l'équateur et pouvant se déplacer parallèlement à lui-même, doit être attiré vers le Sud quand il marche de l'Est à l'Ouest, et repoussé vers le Nord quand il marche en sens opposé. C'est ce qu'a vérifié M. Faraday, au moyen d'un fil de cuivre suspendu horizontalement par deux longs fils verticaux, et dont les extrémités recourbées plongeaient dans des vases pleins de mercure communiquant avec les pôles d'une pile. Si le conducteur mobile est dans le méridien, il se déplace encore parallèlement à lui-même, comme on pouvait le prévoir (1690), et dans un sens qui dépend de celui du courant. Dans les positions obliques au méridien, le courant se transporte encore dans le sens prévu. On peut dire, en général, qu'il se transporte toujours parallèlement à lui-même et du côté de sa gauche, quelle que soit sa direction dans un plan horizontal.

1 *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXI, p. 24 et 77.

1709. On voit que l'hypothèse des courants terrestres explique tout naturellement les diverses actions qu'exerce le globe sur les aimants et sur les courants, et vient simplifier de la manière la plus heureuse la théorie du magnétisme terrestre. Nous avons vu (1204) comment Gilbert rendait compte de la direction de l'aiguille aimantée, en considérant la terre comme un aimant. Mais cette hypothèse ne peut expliquer la rotation des courants. D'un autre côté, les variations de l'aiguille aimantée, les perturbations auxquelles elle est sujette, et l'état de fluctuation dans lequel se trouve perpétuellement le magnétisme du globe (1256), ne peuvent être compris qu'avec beaucoup de peine dans l'hypothèse de Gilbert, tandis que tous ces phénomènes se conçoivent facilement quand on les regarde comme produits par des courants, dont la mobilité est bien en rapport avec celle qu'il faut supposer à la cause de tous ces changements.

M. Barlow, pour confirmer le système d'Ampère, a construit une sphère en bois, sur laquelle il a distribué des courants de manière à produire les mêmes effets que produit la terre, sur une petite aiguille aimantée rendue indifférente à l'action terrestre, et placée successivement dans différentes positions près de la surface de la sphère de bois.

1710. De l'origine des courants terrestres. — L'existence des courants terrestres paraît donc bien établie, mais il n'est pas facile d'en trouver l'origine. Remarquons, avant d'exposer les hypothèses qui ont été faites à ce sujet, que la même difficulté existe dans le système de l'aimant terrestre, puisque l'on doit se demander, dans ce cas, quelle est la cause de la séparation des fluides magnétiques.

Ampère attribuait les courants terrestres à des actions chimiques exercées irrégulièrement, par l'eau et divers autres agents, sur la partie intérieure non oxydée de la croûte du globe. Plus tard, M. Seebeck a invoqué les actions énergiques qui se produisent dans les grandes séries volcaniques signalées par L. de Buch. Masson voit l'origine de ces courants dans l'action thermo-électrique du noyau en fusion, sur les parties les plus profondes de la couche solide. Ces parties, de différentes natures et différemment échauffées, produiraient des courants thermo-électriques qui envelopperaient le globe d'un réseau donnant un courant résultant de l'Est à l'Ouest. Dans ces diverses hypothèses, les variations séculaires proviendraient des changements lents qui s'accomplissent dans l'écorce du globe.

On a supposé encore que les courants du globe sont des courants thermo-électriques produits par la chaleur du soleil. Remarquons, en effet, que les régions de la zone équatoriale séparées par le méridien occupé par le soleil, sont inégalement échauffées, celle qui est à l'Ouest l'étant moins que celle que quitte le soleil, laquelle vient d'en ressentir l'influence. Il résulte de là des courants dirigés à peu près parallèlement à l'équateur, parce que c'est dans cette direction que les différences de température de part et d'autre du méri-

dien sont le plus prononcées; et de forme irrégulière, à cause de la distribution inégale des continents et des mers, et de la conductibilité inégale du sol.

Les hypothèses qui précèdent ne rendent pas compte des variations diurnes, mensuelles et annuelles de l'aiguille aimantée, variations évidemment liées à la marche du soleil. Aimé a cherché à les expliquer par les courants thermo-électriques[1]. Il commence par rappeler que les variations diurnes se font symétriquement dans les deux hémisphères (1252); que leur amplitude diminue à mesure qu'on se rapproche de l'équateur, et qu'elle augmente en un même lieu quand le soleil se rapproche du parallèle de ce lieu. Cela posé, remarquons que la plus forte chaleur en un point donné se manifeste vers deux heures du soir, quand le soleil est à 30° de son méridien (II,1105); en ce moment, les courants, rayonnant autour de ce point, ont leur intensité maximum. Ces courants peuvent être remplacés par un seul courant résultant dirigé à peu près suivant le méridien et ayant pour effet d'en écarter ou d'en rapprocher l'aiguille aimantée. Quand le point échauffé, qui suit le mouvement du soleil, s'éloignera de l'aiguille, le courant résultant agira avec moins de force; ce sera donc vers 2 heures qu'aura lieu le maximum de la déviation, comme l'indique l'observation. Aimé cherche aussi à rendre compte des variations de l'inclinaison et de l'intensité. La position variable du soleil par rapport à l'équateur lui sert à expliquer les changements avec les saisons, de l'amplitude des variations diurnes, et les variations mensuelles et annuelles.

Nous pensons, avec M. de La Rive, que les courants terrestres doivent être divisés en deux groupes distincts : 1° ceux qui déterminent la direction générale de l'aiguille; 2° ceux qui produisent ses variations. Les courants qui produisent le premier effet peuvent être dûs, soit à l'action du noyau en fusion sur la croûte solide, action produisant des courants électro-chimiques, comme le supposait Ampère, ou thermo-électriques, suivant Masson; soit à l'échauffement du sol par le soleil, soit aux actions chimiques qui se manifestent à la surface de la terre, soit enfin à toutes ces causes réunies. Les variations seraient dues à une toute autre cause, particulièrement à ces courants électriques, dont nous avons parlé en traitant des aurores polaires (1410), qui traversent l'atmosphère de l'équateur au pôle, où le fluide positif se réunit à l'électricité négative du sol. L'intensité de ces courants atmosphériques dépend, pour chaque lieu, de la position du soleil par rapport à son méridien; ils sont le plus intenses au moment de la plus forte chaleur, c'est-à-dire vers 2 heures; ils agissent d'une manière opposée sur le même méridien dans les deux hémisphères; et produisent un effet plus grand dans l'hémisphère où se trouve le soleil. Les fluctuations continuelles de l'aiguille aimantée sont la conséquence directe du mode de production de ces courants, et de la nature du milieu qui leur sert de véhicule. Quand les décharges qui ont lieu près des pôles, sont assez

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XVII, p. 217.

violentes pour donner lieu à des aurores polaires, l'aiguille éprouve des déviations plus intenses et plus irrégulières, qui constituent les *perturbations*. M. de La Rive, qui a proposé cette explication ingénieuse [1], regarde la régularité des variations diurnes pendant les orages et les tempêtes, comme une objection à sa théorie; mais il faut remarquer que les orages et les tempêtes sont circonscrits dans un espace relativement très petit par rapport à celui que parcourt le courant atmosphérique dans les régions calmes des parties supérieures de l'air.

Les courants atmosphériques sont accompagnés de courants en sens contraire dans le sol, dont les effets se combinent avec ceux des premiers. Ces courants de retour ont été observés par MM. de La Rive, Baumgartuer, Barlow, qui les ont dérivés dans de longs fils télégraphiques communiquant par leurs extrémités avec le sol [2]. M. Barlow a fait ses observations sur 4 lignes partant de Derby, dirigées vers le Nord, le Nord-Est, le Sud et le Sud-Ouest. L'aiguille du réomètre intercalé dans le fil, était toujours plus ou moins déviée, et d'une manière opposée sur les lignes de la partie Nord de la rose, et sur celles de la partie Sud. Dès que la communication avec le sol était supprimée, il n'y avait plus de courant perceptible. Les résultats sont les plus réguliers dans le fil dirigé au Nord-Est, et la marche de l'aiguille du réomètre est d'accord avec celle de l'aiguille de déclinaison ; en effet, de 8 heures du matin à 9 heures du soir, le réomètre indique un courant du Sud au Nord, et le pôle austral de l'aiguille de déclinaison dévie vers l'Ouest ; pendant la nuit, le courant va du Nord au Sud, et l'aiguille de déclinaison dévie à l'Est. Les déviations étant inverses de celles que produiraient les courants dérivés des fils télégraphiques, on doit attribuer ces déviations aux courants atmosphériques, qui marchent en sens contraire. — Les perturbations avaient presque toujours lieu en même temps sur les quatre lignes.

Nous avons vu (1258) qu'on a tenté d'expliquer les variations, par l'action du soleil; nous verrons plus loin comment on a modifié cette explication en s'appuyant sur l'induction produite par le magnétisme sur les corps en mouvement.

S. — THÉORIE ÉLECTRO-DYNAMIQUE DU MAGNÉTISME.

I. Assimilation des aimants à des solénoïdes.

1711. Dans cette même année 1820, où il découvrit les actions des courants les uns sur les autres et l'action de la terre sur les courants, Ampère posait les bases d'une nouvelle théorie, dans laquelle, rejetant les deux fluides de Coulomb, il ramène tous les phénomènes magnétiques à des effets de courants. Cette

[1] *Bibliothèque universelle de Genève* (Archives des sciences), t. XXIV, p. 375.
[2] *Bibliothèque universelle de Genève* (Arch. des sc.), t. XI, p. 37 et 299.

théorie lui vint à l'esprit pendant qu'il vérifiait les premiers phénomènes de l'électro-magnétisme, et c'est pour la contrôler qu'il entreprit ses recherches sur les actions mutuelles des courants.

Dans cette nouvelle théorie, que les découvertes subséquentes n'ont fait que confirmer de plus en plus, on suppose que : 1° les particules des aimants sont entourées de petits courants circulaires perpendiculaires à l'axe de l'aimant, et tous dirigés dans le même sens ; 2° ces petits courants, désignés sous le nom de *courants d'Ampère*, existent aussi dans les substances simplement magnétiques, mais leurs plans n'ont aucune direction constante, de manière que les actions qu'ils tendent à produire s'entre-détruisent. L'aimantation a pour effet de leur donner les directions qu'ils possèdent dans les aimants. On conçoit facilement, du reste, que tous les petits courants moléculaires placés dans une même section transversale d'un aimant, produiront le même effet qu'un courant unique de même sens et d'intensité convenable qui suivrait le contour de la section, comme en S (*fig.* 1267).

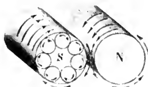


Fig. 1267.

Cette nouvelle explication du magnétisme, qui constitue l'une des plus belles créations scientifiques de notre siècle, rend compte avec la plus grande facilité de tous les phénomènes du magnétisme et de l'électro-magnétisme ; nous allons les passer successivement en revue.

1712. Explication des différents phénomènes magnétiques et électro-magnétiques. — On voit tout d'abord pourquoi chaque portion d'un aimant brisé présente les mêmes propriétés que l'ensemble, tout étant disposé de la même manière dans les fragments et dans l'aimant entier.

Action directrice de la terre. — Le courant terrestre a pour effet de diriger un courant fermé, perpendiculairement au méridien magnétique, de manière que dans la partie inférieure le courant marche de l'Est à l'Ouest (1705) ; il en sera de même de tous les courants élémentaires de l'aimant, dont l'axe devra alors se placer dans le méridien magnétique. Une fois dans cette position les courants élémentaires marchant, dans leur partie inférieure, de l'Est à l'Ouest, on pourra marquer sur la surface de l'aimant, la direction du courant enveloppant qui peut les remplacer. Si l'on regarde la base de l'aimant qui se trouve du côté du Sud, S (*fig.* 1267), ce qui suppose que l'on se tourne vers le Nord, ce courant marchera de l'Est à l'Ouest à la partie inférieure. Pour se rappeler ce résultat, il suffit de remarquer, avec M. Faraday, que ce sens est celui du mouvement des aiguilles d'une montre. Il sera donc toujours facile de trouver le sens des courants dans un aimant dont on connaîtra les pôles.

Action des courants sur les aimants. — Un courant rectiligne tourne un aimant transversalement à sa direction, le pôle Nord à sa gauche ; c'est

que, dans cette position, les courants d'Ampère sont parallèles au courant rectiligne, et de même sens dans la partie la plus voisine (1692).

Si l'aimant, ayant son pôle Nord à gauche du courant, est mobile dans le sens de sa longueur, il se déplacera jusqu'à ce que sa ligne neutre soit en face du courant; les courants d'Ampère, attirés par leur partie la plus rapprochée du courant fixe, étant alors en même nombre de part et d'autre. Dans toute autre position il y aura mouvement, et il est facile de voir que l'équilibre sera stable; il serait instable si le pôle Nord était à gauche du courant, comme M. Boisgiraud l'a constaté par l'expérience (1662).

Actions mutuelles des aimants. — Si l'on met en présence deux pôles de nom contraire, les courants iront dans le même sens dans ces pôles, puisque les aimants auxquels ils appartiennent sont disposés comme deux portions d'un même aimant coupé en deux à l'endroit des pôles qui se touchent; il y aura donc attraction. Si l'on retourne bout à bout l'un des aimants, les courants y seront de sens contraire à ceux de l'autre aimant, et les pôles en présence se repousseront. Si les aimants, au lieu d'être sur le prolongement l'un de l'autre, sont l'un à côté de l'autre (*fig.* 1267), on voit qu'ils devront s'attirer, si les pôles contraires sont du même côté; car les parties les plus rapprochées seront alors de même sens; et se repousser, si les pôles en présence sont de même nom.

Aimantation. — Dans les substances magnétiques, les courants élémentaires ont des directions quelconques; pour les aimanter, il suffit de donner à ces courants une même direction. C'est ce que l'on peut faire avec un courant, qui tourne les courants élémentaires les moins éloignés, parallèlement à sa direction, de manière qu'ils aillent dans le même sens que lui dans les parties les plus rapprochées. Ces courants ainsi orientés, agissent ensuite sur les autres, de manière que l'action s'étend de proche en proche jusqu'aux extrémités. Les hélices, en agissant tout autour du barreau et sur un grand nombre de sections, produisent une aimantation plus intense.

Un aimant agit de la même manière que l'hélice, par les courants élémentaires, tous dirigés dans le même sens, qu'il contient. S'il y a de la force coërcitive, les courants élémentaires exigent, pour être dirigés, que cette force soit vaincue; mais alors la position qui leur est donnée persiste, et l'aimantation est permanente; tandis que, sans la force coërcitive, ces courants retomberaient dans leur confusion primitive.

Il résulte de là que l'aimantation doit avoir un maximum, qui a lieu quand tous les courants sont complètement orientés. Or, c'est ce que nous avons vu pour les électro-aimants (1670). Il semble résulter aussi, des mouvements particulaires qui ont lieu pendant l'aimantation (1677), que les courants élémentaires sont fixés aux particules, et que ce sont celles-ci qui changent de position pendant l'orientation des premières; et alors la force coërcitive n'est autre chose que la résistance des molécules au déplacement, résistance d'autant plus grande que le corps est moins ductile.

Un courant fermé prend deux positions d'équilibre, par rapport à un courant

indéfini parallèle à son plan; mais une de ces positions est instable. Cela explique l'existence des points conséquents des aimants; l'équilibre instable étant maintenu par la résistance que les courants élémentaires éprouvent, en vertu de la force coërcitive, à se retourner de 180°.

1713. SOLÉNOIDES. — Ampère désigne sous le nom de *solénoïde* ou *cylindre électrodynamique*, un système de courants circulaires infiniment petits, infiniment rapprochés, de même sens, et tous normaux à une même ligne, droite ou courbe. Il résulte de là qu'un aimant doit être considéré comme un faisceau de solénoïdes. Pour confirmer sa théorie du magnétisme, Ampère a construit des systèmes de courants circulaires imitant la disposition des *solénoïdes*, et il a cherché à reproduire avec eux tous les phénomènes que produisent les aimants. La *fig.* 1263 représente un de ces *solénoïdes* artificiels : un fil de cuivre est plié de manière à former des cercles parallèles *rr*..., communiquant les uns avec les autres par de petites portions rectilignes *aa*..., perpendiculaires à leur plan, et dont les actions sont neutralisées par des parties rectilignes dirigées suivant l'axe du système, et qui se relèvent ensuite en *f*, *f'* et se terminent par des crochets *c*, *c'* servant à suspendre le système d'une manière très mobile. Les flèches indiquent le sens du courant dans ses différentes parties, quand le pôle positif de la pile communique avec la coupe *c*.

Fig. 1268.

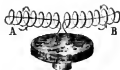


Fig. 1269.

Un fil enroulé en hélice, et dont les extrémités reviennent suivant l'axe, comme on le voit en AB (*fig.* 1269), produira les mêmes effets; car, d'après le principe de la décomposition des courants, chaque spire peut être remplacée par ses deux projections, l'une, circulaire, sur un plan perpendiculaire à l'axe; l'autre, rectiligne, sur une droite parallèle à l'axe, et cette dernière est neutralisée par les parties rectilignes du courant, qui reviennent suivant l'axe. Pour donner une grande énergie à un solénoïde, on le forme d'un fil fin recouvert de soie et faisant un grand nombre de tours juxta-posés sur un cylindre de carton, comme *ab* (*fig.* 1270).

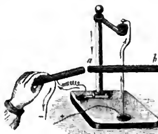


Fig. 1270.

Les propriétés des solénoïdes sont les mêmes que celles des aimants. 1° Un solénoïde se dirige dans le méridien magnétique, de manière que, dans la partie inférieure de chaque spire, le courant marche de l'Est à l'Ouest. On doit donc y distinguer, comme dans les aimants, *un pôle Nord* et *un pôle Sud*

— 2° Si le solénoïde était mobile autour d'un axe perpendiculaire au méridien magnétique, son axe se dirigerait parallèlement à l'aiguille d'inclinaison, d'après ce que nous avons vu (1703). — 3° Un courant indéfini tourne un solénoïde en croix avec lui-même, de manière que son pôle Nord soit à sa gauche. — 4° Deux solénoïdes se repoussent par les extrémités de même nom, et s'attirent par les extrémités de nom contraire. — 5° Un aimant et un solénoïde agissent l'un sur l'autre comme deux solénoïdes ou comme deux aimants. Dans la *fig.* 1270, on voit un solénoïde mobile *ab*, avec lequel on peut faire ces différentes expériences avec facilité. Quand on fait agir deux solénoïdes l'un sur l'autre, on peut les faire traverser par un même courant, comme on le voit dans la figure.

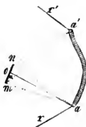


Fig. 1271.

1714. Résultats du calcul. — Ampère et Savary ont appliqué la formule qui donne les actions de deux éléments de courants (1698), aux courants infiniment petits des solénoïdes [1]. Il résulte de leurs calculs, que l'action d'un solénoïde d'un très petit diamètre *aa'* (*fig.* 1271) sur un élément de courant *mn*, se réduit à deux forces *r*, *r'* passant par les extrémités du solénoïde et perpendiculaires à un plan passant par l'extrémité considérée et par l'élément de courant. *Chacune de ces actions f varie en raison inverse du carré de la distance r, et proportionnellement au sinus de l'angle α que fait l'élément avec la droite oa qui joint son milieu à l'extrémité a*; de sorte qu'on a $f = \frac{M c \delta \sin \alpha}{r^2}$, formule qui coïncide avec celle qui exprime l'action d'un aimant sur un élément de courant (1660), et dans laquelle M est une constante qui dépend du solénoïde.

Il résulte de là que la forme d'un solénoïde n'a aucune influence sur les effets qu'il produit, et que tout dépend de la position de ses extrémités. Comme celles-ci agissent en sens opposé, il ne doit donc pas y avoir d'action quand elles se joignent de manière à former un anneau fermé. C'est, en effet, ce que l'expérience vérifie. Or, un aimant de forme annulaire donne les même résultats : MM. Gay-Lussac et Walter ayant aimanté un anneau d'acier en l'entourant d'une hélice réophore, reconnurent que cet anneau ne produisait aucun effet magnétique; cependant il était bien aimanté; car, l'ayant brisé, ils trouvèrent que chaque fragment constituait un aimant complet.

Le calcul montre encore que l'action exercée par l'extrémité d'un solénoïde indéfini sur un petit courant fermé, est la même que celle qu'exerce le pôle d'un aimant sur un élément magnétique. Tous les résultats donnés par l'analyse, tant pour les actions des aimants les uns sur les autres, que pour la distribution du magnétisme dans leur intérieur, se retrouveront donc quand on considérera les aimants comme des systèmes de solénoïdes.

[1] *Mém. de l'Ac. des sc.*, t. IV, 266; et *Ann. de ch. et de ph.*, 2e série, t. XXIX, 381.

Il y a cependant entre les aimants et les solénoïdes une différence, mais qui s'explique facilement; c'est que les pôles des aimants ne sont pas placés à leurs extrémités comme ceux des solénoïdes. Cela tient à ce que les aimants sont des faisceaux de solénoïdes, dont les petits courants fermés agissent les uns sur les autres.

Considérons, par exemple, un courant circulaire *ac* (*fig.* 1272) placé à gauche de l'axe AB, et près de l'extrémité A; les parties les plus rapprochées, *a'*, des courants qui sont à droite de *mn*, repousseront la partie *c* et attireront la partie *a*, et comme il y a plus de courants au-dessous de *ac* qu'au-dessus, les actions résultantes sur *a* et sur *c* seront dirigées obliquement à AB. Les courants placés à la gauche de *mn* tendront à produire l'effet inverse, mais comme ils sont moins nombreux, le courant *ac* s'inclinera comme il est figuré, et d'autant plus qu'il sera plus éloigné de la ligne moyenne MM, et de l'axe AB. Les axes des solénoïdes formés par ces séries de petits courants, formeront donc des lignes convexes vers l'axe, dont les courbures seront d'autant plus prononcées qu'elles seront plus éloignées de cet axe, et que l'aimant sera plus gros. Les pôles de ces solénoïdes étant à leurs extrémités, le point d'application de la force résultante, c'est-à-dire le pôle de l'aimant sera à une certaine distance de son extrémité A*m*. C'est sans doute en partie à cette distribution des pôles des solénoïdes élémentaires que les aiguilles aimantées en forme de losange doivent d'être plus fortes que les aiguilles rectangulaires (1226).

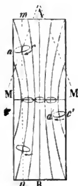


Fig 1272.

Si l'on pouvait obtenir un aimant formé d'une file unique de molécule, ses pôles seraient exactement à ses extrémités. Nous avons vu, en effet, que les pôles des aimants se rapprochent d'autant plus des extrémités, que leur section est plus petite (1216). En outre, M. Savary a trouvé, par le calcul, qu'il y a identité complète entre les actions d'un filet magnétique, et celle d'un solénoïde, quand ce dernier agit à une distance assez grande pour que son diamètre soit négligeable; et que le filet magnétique, comme le solénoïde, a ses pôles situés à ses extrémités.

1715. Action d'un aimant sur le fer doux. — Il nous reste à expliquer dans la théorie d'Ampère, un point qu'on avait généralement laissé de côté et qui a été élucidé avec soin par M. Du Moncel [1]. Si l'on appuie un barreau de fer doux PP' (*fig.* 1273) sur le pôle d'un aimant, SN, d'après la théorie de Coulomb, le morceau de fer devient un aimant ayant sa ligne neutre et ses deux pôles; d'après celle d'Ampère, le fer doux doit former un solénoïde formant la continuation de celui que représente l'aimant, et l'ensemble doit constituer un seul aimant dans lequel la position des pôles mathématiques et celle de la ligne

[1] *Étude du magnétisme et de l'électro-magnétisme*, par M. Du Moncel, Paris, 1858.

neutre dépendra de la force relative et des dimensions des deux solénoïdes placés l'un à la suite de l'autre. Or, l'expérience du spectre magnétique (1194) a montré à M. Du Moncel, que la ligne neutre *nn* de l'aimant se rapproche en effet du fer doux, et que celui-ci présente par toute sa surface l'attraction magnétique, sans partie neutre, de manière à former «*l'épanouissement*» du pôle de l'aimant. On reconnaît aussi au moyen d'une petite aiguille aimantée, que tous les points de la surface sont de même nom. Quand le fer doux est éloigné de l'aimant, la partie la plus rapprochée présente un pôle de nom contraire à celui de l'aimant ; les actions mutuelles des courants d'Ampère orientés dans le fer, lui donnant alors une constitution électro-magnétique, que la présence de l'aimant ne peut que modifier, et, d'autant moins que la distance est plus grande.

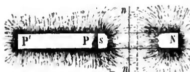


Fig. 1273.

Si l'on juxtapose deux aimants égaux bout-à-bout par les pôles contraires, ils devraient, d'après la théorie d'Ampère, n'en former qu'un ayant sa ligne neutre au point de jonction ; c'est en effet ce que montre le spectre magnétique, dont les courbes enveloppent ce point ; elles sont seulement un peu déformées, à cause de l'imperfection du contact.

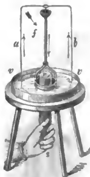


Fig. 1274.

II. Rotation des courants par les aimants, et des aimants par les courants.

1716. Rotation des courants par les aimants. — Si les aimants peuvent être considérés comme des systèmes de courants circulaires, ils doivent produire sur les courants mobiles, les mouvements que produisent les courants circulaires. C'est, en effet, ce qu'a reconnu M. Faraday, au moyen d'un petit appareil qui a été perfectionné et modifié de diverses manières [1]. La *fig.* 1274 représente, à quelques détails près, la disposition adoptée par Ampère pour reproduire cette curieuse expérience. On voit que c'est l'appareil de la *fig.* 1243; seulement, le centre du vase est ouvert de manière qu'on puisse y introduire verticalement un aimant *ns*. Si *n* est le pôle Nord, et si le courant descend dans les fils *a* et *b*, le système mobile tourne dans le sens de la flèche *f*, comme l'indique la théorie. On peut changer le sens du mouvement, soit en renversant le courant, soit en remplaçant le pôle Nord de l'aimant, par le pôle Sud. Un solénoïde mis à la place de l'aimant

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XVIII, p. 329.

produit exactement les mêmes effets. Quelquefois l'appareil lui-même fournit le courant, comme dans celui de la *fig.* 1266; il suffit, pour cela, que le vase *vv* soit en zinc.

M. Breton a produit la rotation des courants par les aimants, au moyen de l'appareil (*fig.* 1275) : deux systèmes mobiles *ff*, *f'f'* peuvent pivoter sur les pôles d'un aimant en fer à cheval. Les extrémités des fils *ff*, *f'f'* plongent dans des capsules pleines de mercure *m*, *m'*, qui sont isolées des branches de l'aimant. On fait communiquer ces capsules avec les pôles d'une pile, et le circuit est fermé par l'aimant lui-même. On voit alors les systèmes mobiles *ff*, *f'f'* tourner dans le même sens; car, si les courants y marchent en sens inverse, d'un autre côté les pôles de l'aimant sont de nom contraire. Si l'on renverse le courant, le sens du mouvement change dans les deux branches de l'appareil.

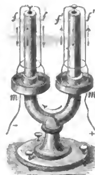


Fig. 1275.

On peut encore, comme l'a fait M. Cumming, opérer avec un courant thermo-électrique : *c* (*fig.* 1276) est un fil de cuivre soudé en *a* et *b* à un fil de platine *aorb*. Le système est suspendu par une pointe *o*, à l'extrémité d'un aimant vertical *n*. Une lampe à alcool échauffe la soudure *b*, et le système tourne par l'action de l'aimant sur la partie *oa*, la partie *orb* étant assez éloignée pour ne pas subir d'action sensible. La soudure *b* s'échauffant à chaque tour, le mouvement continue indéfiniment.

M. Marsch a imaginé un appareil qui fonctionne aussi sans pile séparée, et dans lequel on obtient simultanément le mouvement dans les deux sens. Un vase annulaire en cuivre *c c'* (*fig.* 1277) peut pivoter sur l'extrémité d'un barreau aimanté, au moyen d'une pointe *o'* fixée à l'arc AA. Ce vase est rempli d'eau acidulée, dans laquelle peut tourner un cylindre en zinc *zz*, soutenu par l'arc *a a* et par une pointe *o* qui s'enfonce dans une petite cavité pratiquée à l'extrémité de l'aimant. L'action de l'eau acidulée sur le zinc produit un courant qui suit la direction des flèches, dans les arcs AA, *aa*, lesquels tournent en sens opposé sous l'influence de l'aimant.

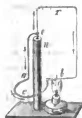


Fig. 1276.

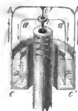


Fig. 1277.

Roue de Barlow. — Une roue très légère (*fig.* 1278) armée de pointes profondément découpées dans un disque de cuivre, est mobile autour d'un axe horizontal reposant sur des supports métalliques. Pendant la rotation, les pointes viennent plonger successivement dans du mercure remplissant une cavité creusée dans la table de l'appareil, entre les branches d'un aimant

en fer à cheval. On fait communiquer les pôles d'une pile avec l'axe de la roue, par la colonne qui la soutient, et l'autre pôle, avec le mercure. Le circuit est fermé par la pointe qui plonge dans ce liquide. Si le pôle nord de l'aimant est en avant de la figure, les courants d'Ampère qui circulent dans les deux branches, présentent en dedans, à la roue, leurs parties verticales et montantes ; et la pointe verticale, dans laquelle le courant est supposé descendre, est chassée vers la gauche, puis remplacée par une autre pointe, repoussée à son tour ; de manière que la roue tourne rapidement dans le sens de la flèche *r*. Si l'on renverse le courant, le mouvement change de sens. Ce phénomène peut aussi se rattacher au mouvement qu'un aimant imprime à un courant mobile qui lui est perpendiculaire (1702).

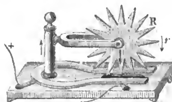


Fig 1278.

1717. Rotation des aimants par les courants. — Pour faire tourner un aimant sous l'influence d'un courant, on emploie l'appareil suivant : V (*fig.* 1279) est une éprouvette remplie de mercure dans lequel flotte un aimant vertical *n*, représenté à part en *n's*, lesté par un cylindre de platine *p*. En *n* est vissée une petite coupe contenant du mercure dans lequel s'enfonce une pointe de métal *t* Cette pointe communique par *ab* avec l'un des pôles d'une pile, dont l'autre pôle communique avec le mercure de l'éprouvette, par *o'c* et par un anneau *a* qui plonge dans ce liquide. L'électricité positive arrivant en *o'*, et la négative, en *o*, le courant passe de l'anneau *a* à l'aimant *n*, en suivant la surface du mercure, et retourne à la pile par la tige *t* et le bras *b*. On voit alors l'aimant tourner sur lui-même. Si on le renverse de manière à mettre le pôle Sud en haut, il se meut en sens contraire. Si, sans modifier la position de l'aimant, on change le sens du courant, le sens de la rotation change aussi.

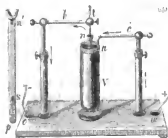


Fig. 1279.



Fig. 1280.

Ampère a expliqué ce mouvement, dans sa théorie, par l'action des courants qui circulent, suivant les rayons, à la surface du mercure, sur les courants circulaires qu'il suppose exister dans l'aimant. Soit *ac* (*fig.* 1280), le pôle Nord de ce dernier dans lequel les courants circulaires ont la direction des flèches, et *n* un des courants qui circulent sur le mercure en allant, par exemple, du centre

à la circonférence. Le courant *n* attire la partie *a* du courant de l'aimant, qui s'éloigne comme lui du point de croisement, et repousse la partie *c* qui s'approche de ce point. Il y a donc rotation de l'aimant dans le sens de la flèche *r*. Tous les courants qui glissent sur le mercure agissant de la même manière que le courant *n*, le mouvement sera très rapide. On voit que le mouvement est en sens contraire du courant de l'aimant, quand son pôle Nord est en haut et que le courant extérieur est dirigé du centre à la circonférence ; c'est, en effet, ce que l'expérience constate. On voit que le phénomène est tout-à-fait analogue à celui que l'on produit avec les spirales de Savary (1694).

Ampère a encore obtenu un mouvement de rotation, en remplaçant l'aimant par un cylindre en cuivre, et la tige *t* (*fig.* 1278) par un aimant terminé en pointe ; il a vu le cylindre de cuivre tourner sur lui-même. Dans ce cas, l'effet est dû à l'action de l'aimant fixe sur les courants verticaux parcourant le cylindre de cuivre, de sa base supérieure à la surface du mercure. Le phénomène est un cas particulier de la rotation des courants par les aimants (1716).

Au lieu de placer l'aimant dans l'axe de l'éprouvette, M. Faraday l'a placé en dehors de cet axe, en enfonçant la tige *t* dans le mercure. Dans ce cas, l'aimant se transporte autour de cette tige, et le sens du mouvement de rotation est le même que celui de l'aimant tournant sur lui-même.



Fig. 1281.

Ampère explique ce phénomène de la manière suivante : soit *ac* (*fig.* 1281) le pôle Nord de l'aimant, et supposons que les courants marchent en rayonnant sur la surface du mercure, du centre à la circonférence, de manière qu'il en passe de part et d'autre de l'aimant. On voit que la partie *c* des courants qu'il contient est attirée par les courants qui glissent sur le mercure du même côté. La partie *a* est, au contraire, repoussée par ceux qui se trouvent de son côté, de sorte que l'aimant est sollicité de *a* en *c* ; et comme il en est de même dans toutes les positions qu'il peut prendre, il tournera d'une manière continue dans le sens de la flèche *r*. On augmente l'effet, en recouvrant l'aimant de gomme laque, pour l'empêcher d'être traversé par les courants, qui sont alors forcés de l'envelopper comme on le voit dans la figure.

L'expérience qui précède a été faite par M. Faraday, avant les admirables travaux d'Ampère. Ce dernier a obtenu, plus tard, la rotation d'un aimant sur lui-même. D'abord, le mouvement de rotation fut attribué à l'action du courant vertical qui suit la tige *t* (*fig.* 1279), et l'on y voyait une objection à la théorie d'Ampère, puisqu'on avait une action exercée par un courant fermé sur un autre courant fermé, mais Ampère montra que ces phénomènes sont dûs au courant qui glissent sur le mercure. Il les reproduisit en remplaçant l'aimant par un solénoïde, et les retrouva par le calcul.

1718. Rotation du mercure par les aimants. — Si l'aimant *n* (*fig* 1279) était fixe, on conçoit que le mercure, à cause de sa mobilité, tournerait en sens

contraire du mouvement de l'aimant, en vertu du principe de l'action opposée à la réaction. C'est, en effet, ce que H. Davy a observé, avant qu'il fût possible d'expliquer les phénomènes [1]. Il opérait simplement en enfonçant les électrodes d'une forte pile à grande surface, dans du mercure, et plaçant au-dessus du point d'immersion de l'un d'eux, le pôle d'un fort aimant vertical; le mercure se mettait à tourner autour de l'électrode. Le mouvement devenait beaucoup plus rapide quand on plaçait au-dessous du vase, le pôle opposé d'un autre aimant. — Davy a aussi opéré de la manière suivante : on fait passer le courant par des fils, qui traversent le fond du vase, et sont recouverts de gomme laque, excepté aux extrémités, que le niveau du mercure ne dépasse que de très peu (*fig.* 1282). Dès que le courant est établi, on voit le mercure se soulever au-dessus des fils, en formant des cônes d'où partent des ondes circulaires; ce qui s'explique par la répulsion des parties consécutives d'un même courant. Si l'on approche le pôle d'un fort aimant vertical, de l'un de ces cônes, on le voit s'affaisser, disparaître, puis se changer en une dépression qui atteint presque l'extrémité de l'électrode; en même temps le mercure prend peu à peu son mouvement de rotation. Le sens de ce mouvement dépend de l'électrode autour duquel il a lieu, et du pôle de l'aimant qu'on en approche; il se fait toujours dans le sens qu'indique la théorie. Davy a produit les mêmes phénomènes dans l'étain en fusion. M. Poggendorff, en opérant sur quelques centimètres cubes de mercure, dans un verre de montre, afin de n'avoir besoin que de quelques couples de Bunsen, a vu le mouvement se ralentir peu à peu, puis cesser tout-à-fait; ce qu'il attribue à ce que le mercure perd de sa fluidité en s'oxydant.



Fig. 1282.

Si l'on enfonce l'aimant dans le mercure, le sens du mouvement dépend du point où la surface de ce liquide rencontre l'aimant, point qui peut être plus haut ou plus bas que le pôle magnétique. Ce résultat, observé en 1824 par M. de La Rive, et étudié plus tard par M. Poggendorff, semble en contradiction avec la théorie d'Ampère. Mais il faut observer que les courants moléculaires ne sont pas parallèles entre eux, d'après ce que nous avons vu (1714). D'un même côté du pôle, les résultats restent constants. Si l'on pouvait opérer avec un seul filet magnétique, dont le pôle occupe l'extrémité, il n'y aurait plus à s'occuper du point d'affleurement; c'est ce qui a lieu quand on emploie un solénoïde au lieu d'aimant.

Quand on opère ainsi avec un solénoïde, on réalise la rotation du mercure par un courant. Ce dernier phénomène peut aussi être produit en enveloppant un vase cylindrique contenant du mercure, par un multiplicateur circulaire, et faisant passer un fort courant dans le mercure, par un anneau placé à l'intérieur du vase et par une tige verticale s'enfonçant dans ce liquide au centre

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LXXV, p. 335.

de l'anneau. La rotation est alors due à l'action du multiplicateur circulaire sur les courants dirigés dans le mercure suivant les rayons ; elle change de sens quand on renverse le courant, soit dans le mercure, soit dans le multiplicateur.

1719. Rotation de l'eau acidulée. — Dans les expériences qui précèdent, l'aimant ou le courant agissent sur l'électricité qui circule dans le mercure; si ce liquide se meut c'est que l'électricité ne s'y déplace qu'avec difficulté. Un liquide moins bon conducteur, comme l'eau acidulée, conviendrait donc mieux, et d'autant plus qu'il serait moins dense ; aussi plusieurs physiciens ont-ils opéré avec différentes dissolutions aqueuses.



Fig. 1283.

M. Jamin a opéré sur l'eau acidulée [1]: un voltamètre cylindrique V (*fig.* 1283) est placé entre deux pôles contraires A, B d'électro-aimant. L'électricité arrive dans l'eau acidulée par de gros fils de platine *m*, *n*, et le courant s'épanouit entre les électrodes. Les parties qui ne sont pas verticales sont sollicitées à tourner, par les pôles magnétiques A, B. On voit, en effet, les bulles de gaz qui se dégagent aux électrodes, monter en décrivant des hélices, l'une dextrorsum, l'autre sinistrorsum ; ce qui indique que le liquide tourne en sens contraire en *m* et en *n*. Le mouvement se fait dans le sens prévu d'après la nature des pôles A, B, et le sens du courant *m n*.

Considérons encore un voltamètre, dans lequel les électrodes *m*, *n* (*fig.* 1284) pénètrent par le fond, et dont l'ouverture circulaire se trouve entre les pôles opposés A, B d'un électro-aimant. Le courant, que nous supposerons partir de *m*, forme en s'épanouissant dans le liquide, au-dessus des fils *m*, *n*, des arcs plus ou moins élevés, dont les parties verticales sont sollicitées par les pôles A et B. Chaque élément de courant vertical partant de *m*, est soumis à deux forces *mp*, *mq*, perpendiculaires aux plans qui passent par cet élément et par les pôles A ou B (1660) ; soit *r* leur résultante. Les courants qui se dirigent verticalement vers *n* sont soumis à des actions donnant la résultante *r'*. Les bulles de gaz s'élèveront donc en formant deux petites colonnes s'écartant l'une de l'autre. Si l'on change le sens de l'aimantation en A et B, on verra les colonnes se rapprocher au lieu de s'éloigner. Si les électrodes sont en *m'*, *n'*, les résultantes *s*, *s'*, feront tourner le liquide, et le sens du mouvement changera avec les pôles A et B. Dans les positions des électrodes, intermédiaires à *m*, *n* et *m'*, *n'*, il y aurait encore rotation, mais moins vivement.

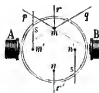


Fig. 1284.

M. E. Wartmann a fait tourner, au moyen d'un aimant, un liquide qui fournissait lui-même l'électricité [2]. Un barreau de fer doux suspendu verticalement

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XLIII, p. 334.
[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XIX, p. 394.

au pôle d'un aimant, plonge dans une dissolution de sulfate de cuivre. Le liquide attaque le fer, et dégage de l'électricité. Le fluide positif se répand dans la dissolution, d'où il revient ensuite au barreau, pour neutraliser le fluide négatif qu'il a reçu, en formant ainsi des courants qui convergent vers ce barreau. Ces courants peuvent être reconnus au moyen d'un réomètre, dont on plonge un des fils dans le liquide tout près du barreau, et l'autre à une certaine distance. L'aimant agit sur ces courants, et le liquide tourne dans le sens indiqué par la théorie. Le liquide doit tenir des particules en suspension et être éclairé vivement. M. Grove a obtenu, en employant l'acide sulfurique étendu, un mouvement assez prononcé pour entraîner de petits flotteurs.

M. Bertin a imaginé des appareils avec lesquels on montre facilement la rotation des liquides, dans différentes conditions. La *fig.* 1285 représente un de ces appareils construit par M. Ruhmkorff. AAA est un vase annulaire en verre contenant de l'eau acidulée, sur laquelle flotte un anneau en liége L, destiné à en indiquer le mouvement. Cet anneau est enduit de noir de fumée pour éviter l'adhérence capillaire aux parois. Le liquide communique avec les pôles d'une pile de 3 ou 4 couples à charbon, par les fils *f*, *f'*, et des lames de cuivre appliquées sur les deux parois cylindriques du vase. E est un aimant ou un électro-aimant, sous l'influence duquel le liquide tourne, quand il est traversé par le courant, dans le sens prévu par la théorie. — Si l'on supprime l'aimant E, le liquide tourne encore, mais lentement, sous l'influence de la terre.

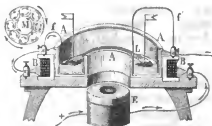


Fig. 1285.

Si l'on soulève l'aimant peu à peu dans le trou central, on remarque que le liquide ne tourne plus quand le pôle de l'aimant se trouve à la hauteur du niveau du liquide. Si l'on continue à soulever l'aimant, la rotation se reproduit, mais en changeant de sens; elle s'accélère jusqu'à ce que le milieu du barreau soit au niveau du liquide, puis elle s'affaiblit, devient nulle quand le pôle inférieur est au même niveau, pour changer ensuite de sens. — Si l'aimant vertical est en dehors de l'appareil, le pôle de l'aimant, pour qu'il n'y ait pas d'action, doit se trouver en des points dont la hauteur dépend de sa distance à l'axe de l'appareil. Ces points forment une sorte d'hyperboloïde de révolution à deux nappes. Ces phénomènes, qui se rattachent aux expériences de M. Boisgiraud (1662), ont été expliqués en détail par M. Bertin, en partant du principe des actions perpendiculaires aux plans qui passent par l'élément du courant considéré, et par les pôles de l'aimant (1660).

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3ᵉ série, t. LV, p. 304, et LVIII, p. 90.

Rotation dans les aimants creux. — On peut produire la rotation du liquide de l'appareil (*fig.* 1285), en faisant passer un courant dans la bobine BB qui entoure le vase annulaire. L'expérience n'est alors que la reproduction de celle du nº 1694. Si l'on met la bobine dans le trou central, le liquide tourne dans le même sens. Ainsi, ce sens reste le même, quand le liquide est dans l'intérieur ou à l'extérieur de la bobine. Il semble qu'il doive en être de même à l'extérieur et à l'intérieur d'un aimant creux ; mais M. Bertin a reconnu que les rotations se font en sens contraire dans l'intérieur et à l'extérieur, et il l'explique en faisant remarquer que, dans les courants d'Ampére qui forment les solénoïdes groupés de manière à constituer un tube, le courant marche en sens inverse en dedans et en dehors, comme on le voit en M (*fig.* 1285). Pour montrer que l'intérieur d'un tube aimanté exerce une action inverse de celle qu'exerce l'intérieur d'une bobine, M. Bertin laisse un espace entre le vase AAA et la bobine BB, et y glisse un tube en fer épais, qui s'aimante, et ralentit, ou même anéantit la rotation que produit la bobine seule.

1720. Conclusions. — On peut conclure des développements qui précèdent, que la théorie électro-magnétique d'Ampère explique de la manière la plus satisfaisante les phénoménes du magnétisme, les actions des aimants sur les courants, et celles des courants sur les aimants. Cette théorie établit un lien naturel entre les phénomènes de l'électro-dynamique, du magnétisme, de l'électro-magnétisme, et même du magétisme terrestre (car le globe, avec sa ceinture de courants, doit être considéré comme un immense solénoïde), et elle permet de les grouper autour d'un fait unique, savoir, l'action mutuelle de deux éléments de courant. Dans la théorie de Coulomb, on est forcé d'admettre l'existence de deux fluides qui n'ont jamais pu être isolés; cette théorie ne peut expliquer les phénoménes électro-magnétiques, ni surtout les mouvements de rotation des courants par les aimants et des aimants par les courants, que la théorie d'Ampère explique avec tant d'élégance. Avant la découverte fondamentale d'Œrsted, l'hypothèse des deux fluides magnétiques avait suffi à la science; cette hypothése avait été surtout mise en faveur par les recherches analytiques de Poisson, qui était parvenu à faire ressortir, pour ainsi dire, de ses savants calculs tous les phénomènes connus. Mais les résultats obtenus par l'illustre géomètre sont tout aussi bien à l'avantage de la théorie d'Ampére, puisque nous avons vu que l'action exercée sur un élément de courant, par un des courants circulaires d'un solénoïde, est la même que celle qu'exerce un élément magnétique (1714). Remarquons encore que Coulomb s'était approché de la vraie théorie du magnétisme autant qu'il était possible avant la découverte de l'action des courants sur l'aiguille aimantée; car il avait reconnu que le magnétisme ne se transporte pas dans l'intérieur des aimants, que tout se passe dans les éléments magnétiques, et que les actions extérieures qu'ils produisent ne sont que les effets de la résultante des actions de tous les éléments. Ampère est venu ensuite, qui a montré que ces éléments magnétiques sont constitués par de petits courants électriques.

Nous allons voir comment la découverte de l'induction électro-dynamique est venue confirmer d'une manière inattendue la théorie d'Ampère, en permettant de développer de l'électricité au moyen d'aimants, et de reproduire avec cette électricité tous les effets dont est capable cet agent, soit à l'état statique, soit à l'état dynamique.

§ 4. — COURANTS D'INDUCTION.

I. Induction par les courants et les aimants. — Machines magnéto-électriques.

1721. Induction par les courants. — Les phénomènes de l'*induction électro-dynamique* ont été découverts par M. Faraday, en 1832[1]. C'est là une de ces découvertes primordiales, qui ouvrent des voies nouvelles, et servent de point de départ à une longue suite de recherches fécondes. Voici l'énoncé des principaux faits :

1° Si l'on approche rapidement un fil réophore d'un circuit fermé, il se produit aussitôt, dans ce circuit, un courant nommé *courant induit* ou *courant d'induction*, de sens contraire au *courant inducteur* qui parcourt le fil réophore, c'est pourquoi on l'appelle courant induit *inverse*, ou *négatif*.

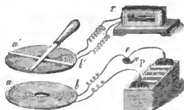


Fig. 1286.

2° Le courant induit n'a qu'une durée insensible; il disparaît donc aussitôt après avoir pris naissance.

3° Quand on éloigne le courant inducteur, il se manifeste dans le circuit fermé, un nouveau courant instantané ; mais, cette fois, de même sens que le courant inducteur. On le nomme courant induit, *direct* ou *positif*.

Pour produire facilement ces courants d'induction, on enroule, en forme de spirale plane *a'b'* (*fig.* 1286), un fil de cuivre recouvert de soie, et l'on joint ses extrémités à celles du fil d'un réomètre *r*, de manière à former un circuit fermé. Une autre spirale *ab* est parcourue par le courant d'une pile P. Si l'on approche brusquement la spirale *a'b'* de la spirale *ab*, ou réciproquement, l'aiguille du réomètre se dévie aussitôt, de manière à indiquer en *a'b'* un courant de sens contraire au courant qui parcourt *ab* ; et immédiatement après, cette aiguille revient en oscillant, à sa position d'équilibre ; le courant induit n'a donc qu'une durée insensible. Quand on éloigne rapidement la spirale *a'b'*, l'aiguille se dévie en sens contraire de sa première déviation, de manière à indiquer un courant induit de même sens que le courant inducteur.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XLVIII, p. 402, et L, p. 15.

Ces courants induits sont d'autant plus intenses que les mouvements sont plus rapides. Il suffit, du reste, pour obtenir des effets sensibles, de faire varier seulement la distance entre les deux spirales, pourvu que le mouvement soit rapide. Si ce mouvement a une durée appréciable, le courant induit n'est plus instantané : il présente cette même durée, mais son intensité est très faible.

Au lieu d'approcher et d'éloigner l'une des deux spirales, on peut les laisser appliquées l'une sur l'autre, et introduire subitement le courant dans *ab*, ou le supprimer, ce qui se fait facilement au moyen d'une capsule de mercure *o*. Les courants d'induction qui se développent en *a'b'* au moment où l'on introduit le courant en *ab* et au moment où on le supprime, sont plus intenses que par l'autre méthode, le courant inducteur agissant beaucoup plus brusquement. Quand on veut opérer par cette méthode, on se sert de préférence d'une bobine en bois B (*fig.* 1287), sur laquelle on enroule ensemble deux fils recouverts de soie, dont les bouts sortent en *r*, *r'* et *c*, *c'*. L'un des fils, *rr'*, est mis en communication avec le réomètre, et l'autre *cc'*, avec la pile ; l'aiguille du réomètre accuse l'existence du courant instantané *négatif* au moment où l'on introduit le courant dans *cc'*, et celle du courant *positif*, au moment où on le supprime.

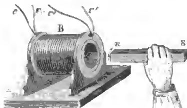


Fig. 1287.

1722. Induction magnéto-électrique. — Les courants d'induction permettent de soumettre à une nouvelle épreuve la théorie électro-magnétique d'Ampère, en cherchant si les aimants sont capables de produire des courants induits. M. Faraday a reconnu qu'il en est ainsi [1]. Pour faire l'expérience, on prend une bobine creuse en bois, comme celle de la *fig.* 1287 ; seulement on a soin de réunir les bouts *r*, *c* des fils, de manière qu'ils n'en forment plus qu'un seul, dont on met les extrémités *r'*, *c'* en rapport avec un réomètre. Au moment où l'on enfonce brusquement un aimant *ns* dans la bobine, on voit l'aiguille se dévier, de manière à indiquer un courant induit de sens contraire aux courants d'Ampère dans l'aimant (1711), puis l'aiguille revient à sa position d'équilibre. Elle est de nouveau déviée et du côté opposé, quand on retire brusquement l'aimant. Si l'on enfonce cet aimant, par son autre pôle, les déviations de l'aiguille se font en sens inverse, comme il était facile de le prévoir.

M. Dujardin a produit des courants d'induction dans le fil d'un réomètre, fil qui était réuni à celui d'un autre instrument semblable, en faisant tourner brusquement l'aiguille du premier. En général, tant que l'aimant enfoncé dans une bobine reste en repos, il n'y a aucun résultat ; mais il suffit de le déplacer, par exemple de l'enfoncer ou de le retirer un peu, pour obtenir un effet sensible.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XI, p. 457.

— Ampère a reproduit tous ces phénomènes, en employant un *solénoïde* au lieu d'aimant.

On peut encore opérer en plaçant dans la bobine, un barreau de fer doux dont on approche et on éloigne rapidement le pôle d'un aimant, de manière à aimanter brusquement ce fer, pour le laisser ensuite revenir à l'état neutre. Les effets sont les mêmes, les courants d'Ampère prenant dans le fer la même direction que dans l'aimant.

C'est au moyen des aimants que M. Faraday a fait ses premières expériences sur l'induction; il fut conduit à les entreprendre, par cette considération que les courants développant du magnétisme dans les barreaux d'acier, les aimants devaient engendrer des courants dans les fils conducteurs, en vertu du principe de la réaction égale et opposée à l'action. Puis, pour contrôler la théorie d'Ampère, il chercha si les courants pouvaient, comme les aimants, produire des courants induits.

Expérience de M. Page. — M. Page a obtenu des courants induits en modifiant simplement l'état magnétique d'un aimant, au moyen du fer doux : un fil de cuivre recouvert de soie est enroulé autour d'un aimant, et ses extrémités sont unies à celles d'un réomètre. Quand on approche brusquement de l'aimant, son armature, elle en augmente la force par influence, en produisant une sursaturation, et il se développe dans l'hélice un courant induit *inverse*. Quand on éloigne l'armature, l'aimant revient à son intensité primitive et il se produit un courant induit *direct*.

1723. Influence d'un barreau de fer sur l'induction électro-dynamique. — Si l'on met dans l'axe de la bobine (*fig.* 1287) un barreau de fer doux, et qu'on développe un courant induit dans le fil *rr'*, au moyen de courants inducteurs lancés dans le fil *cc'*, les effets sont beaucoup plus intenses qu'en l'absence du barreau. Par exemple, un courant inducteur qui donne des courants induits à peine sensibles, en donne de très énergiques quand la bobine contient le barreau de fer. Ce phénomène, découvert par M. Faraday, tient à ce que le fer s'aimante au moment où l'on introduit le courant inducteur, et agit comme un solénoïde dont les courants, de même sens que le courant inducteur, ajoutent leurs effets à celui de ce dernier, avec lequel ils naissent et disparaissent. L'influence du barreau de fer dépend de la rapidité avec laquelle il peut prendre et perdre son aimantation; il faudra donc employer le fer le plus doux. Nous reviendrons plus loin sur ce sujet

1724. Induction dans les liquides. — M. Faraday a produit l'induction dans une colonne d'eau acidulée, renfermée dans un tube en caoutchouc, enroulé autour d'un cylindre de fer doux formant le prolongement du noyau d'un électro-aimant. Des fils de cuivre engagés dans les extrémités du tube, faisaient communiquer la colonne liquide avec un réomètre. Quand l'aiguille était en repos, on lançait le courant de 20 couples de Grove, dans l'électro-aimant, et la déviation brusque du réomètre indiquait un courant induit.

Quand on déchargeait l'électro-aimant, il se produisait une déviation inverse. Avec l'eau pure, il ne s'est manifesté aucune déviation.

Ces résultats semblent trancher la question de la conductibilité des liquides (1573); mais MM. Van Bréda et Logeman ont montré qu'il y a électrolyse dans le liquide induit : pour cela, ils enfoncèrent des fils de platine dans les extrémités du tube de caoutchouc, ils les réunirent par un réomètre, et en même temps par un fil court D. Ayant lancé le courant dans l'électro-aimant, le courant induit du liquide passa par le fil D, et l'aiguille du réomètre resta en repos. Ils enlevèrent aussitôt le fil D, et ils observèrent une déviation de 10° produite par la polarisation des électrodes, et indiquant un courant contraire au courant induit auquel était due cette polarisation. L'aiguille étant revenue peu à peu au repos, ils rétablirent le fil D, et ayant supprimé le courant de l'électro-aimant il se produisit un courant induit direct, accompagné d'une polarisation des électrodes, qu'ils reconnurent par le même moyen, après avoir enlevé le fil D.

1725. Induction par la terre. — La terre pouvant être considérée comme un aimant, ou plutôt comme un solénoïde dans lequel les courants marchent de l'Est à l'Ouest, elle doit être capable de produire des courants induits. C'est ce que M. Faraday a encore constaté [1]. Il opéra d'abord avec une hélice dans laquelle était un barreau de fer doux, et qu'il retournait brusquement bout à bout, après l'avoir placée parallèlement à l'aiguille d'inclinaison. Un réomètre communiquant avec l'hélice indiquait, à chaque mouvement, l'existence d'un courant induit marchant de l'Ouest à l'Est dans la partie inférieure des spires de l'hélice après son renversement. Mais ici l'induction était due à l'aimantation du fer par l'action terrestre. M. Faraday a ensuite opéré avec l'hélice seule, et il a obtenu des courants faibles, mais cependant bien déterminés. En retournant l'hélice plusieurs fois de suite, en ayant soin de faire coïncider les inversions avec les oscillations de l'aiguille, il obtint une déviation de 80°.

M. Faraday a encore procédé de la manière suivante : un fil de cuivre de 3 mètres de longueur plié en rectangle, communique par ses extrémités, situées au milieu du côté horizontal inférieur, avec le fil d'un réomètre. Le côté inférieur étant supposé placé dans le méridien magnétique, si l'on fait passer le côté horizontal supérieur, de l'Est à l'Ouest par dessus le côté inférieur servant de charnière, l'aiguille du réomètre est déviée, de manière à indiquer un courant induit allant du Nord au Sud dans la partie supérieure. De quelque manière que l'on oriente le côté autour duquel on fait tourner le rectangle, on obtient des courants induits, si ce n'est dans le cas où le côté mobile se meut

[1] *Bibl. de Genève* (Arch. des sc.), t. XXV, p. 267, et t. XXVIII, p. 36.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. L, p. 113.

parallèlement à l'aiguille d'inclinaison. L'induction par la terre est facilement mise en évidence au moyen de l'appareil suivant.

Cerceau de M. Delezenne. — AA (*fig.* 1288) est un cerceau en bois, de 1 mètre de diamètre environ, muni d'une gorge dans laquelle est enroulée l'hélice induite. Ce cerceau peut tourner autour d'un axe *oo'* porté par le cadre MN, mobile lui-même autour d'un axe horizontal *cc'*. Des aiguilles mobiles sur des cadrans divisés *o*, *c'*, permettent d'évaluer les déplacements angulaires du cerceau et du cadre. Les extrémités du fil induit aboutissent à des anneaux métalliques isolés l'un de l'autre *a*, *a'*, sur lesquels s'appuient deux petits ressorts, portés par une pièce de bois *n*, auxquels on fixe les extrémités *f*, *f* du fil d'un réomètre.

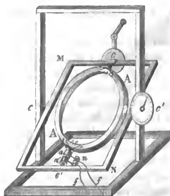


Fig. 1288.

L'axe *oo'* étant dans le méridien magnétique, et le cadre MN, ainsi que le cerceau, étant perpendiculaires à l'aiguille d'inclinaison, si l'on fait faire au cerceau un tour entier en 30s, avec une vitesse uniforme, autour de l'axe *oo'*, on voit l'aiguille du réomètre se dévier peu à peu de manière à indiquer, dans le fil du cerceau, un courant induit direct, qui augmente graduellement, jusqu'au moment où le cerceau ayant tourné de 90°, se trouve vertical. Alors la déviation de l'aiguille est de 19°; puis cette déviation diminue, pour devenir nulle quand le cerceau a tourné de 180°. Le mouvement continuant, l'aiguille se dévie de nouveau, mais en sens contraire. La déviation atteint encore son maximum quand le cerceau passe par le plan vertical, puis elle diminue jusqu'à la fin du tour entier. On voit que le courant induit varie d'intensité en même temps que le *sinus* de l'angle de rotation du cerceau, et change de signe avec lui. — Quand l'axe *oo'* est exactement parallèle à l'aiguille d'inclinaison, il n'y a plus aucun signe de courant induit, quelque rapide que soit le mouvement de rotation.

1726. Loi de Lenz. — Peu de temps après la découverte de l'induction électro-dynamique, M. Lenz a résumé dans l'énoncé qui suit les différents cas dans lesquels elle se manifeste : *Toutes les fois qu'on déplace rapidement un courant ou un aimant dans le voisinage d'un circuit fermé, il se forme dans ce circuit un courant induit de sens tel qu'en agissant, suivant les lois de l'électro-dynamique, sur le courant inducteur ou sur l'aimant, il leur communiquerait un mouvement inverse de celui qu'ils possèdent en produisant l'induction.* Il résulte de là que, si le mouvement imprimé au courant inducteur ou à l'aimant est instantané, le courant induit est lui-même instantané; si ce mou-

[1] *Mémoires de la société des sciences* de Lille, décembre 1844.

vement est continu, le courant induit est lui-même continu. Quelques exemples feront comprendre la généralité de cet énoncé.

1° Un courant inducteur approché parallèlement d'une partie d'un circuit fermé, y développe un courant induit de sens contraire; car un semblable courant, introduit dans le circuit fermé, repousserait le courant inducteur. Si l'on éloigne ce dernier, il se produira un courant induit de même sens que lui; car un semblable courant tendrait à le rapprocher. 2° Une portion rectiligne d'un circuit fermé, perpendiculaire à un courant indéfini et marchant parallèlement à elle-même dans le sens de ce courant, est parcourue par un courant induit continu, allant vers le courant indéfini; car un semblable courant soumis à l'influence d'un courant indéfini marcherait en sens contraire de ce dernier (1690).

Un aimant placé parallèlement à une portion de circuit fermé et auquel on imprime un mouvement angulaire, développe dans ce circuit un courant induit dont le pôle nord occupe *la droite*; car un semblable courant existant préalablement dans le circuit, tournerait le pôle nord à sa gauche. Si l'on enfonce un aimant perpendiculairement jusqu'à sa ligne neutre, dans un anneau, ce dernier reçoit un courant induit tel que le pôle nord de l'aimant soit à sa *droite;* car un semblable courant ferait ressortir l'aimant de l'anneau (1662). — La roue de Barlow mise en mouvement entre les branches de son aimant, est parcourue par un courant continu qui marche suivant le rayon vertical, et de même sens que le courant qu'il faudrait faire passer dans cette roue pour la faire tourner en sens contraire du mouvement qu'on lui imprime. — Les appareils avec lesquels on produit les mouvements de rotation d'un aimant par un courant, ou d'un courant par un aimant, sont parcourus par un courant induit dans le circuit fermé qui en fait partie, quand on fait mouvoir directement la partie mobile, et ce courant a le même sens que celui qu'il faudrait faire passer dans l'appareil, pour imprimer à cette partie mobile un mouvement opposé à celui qu'on lui donne. — Un circuit fermé placé dans le méridien magnétique, et qu'on fait tourner brusquement autour d'un axe vertical pour le mettre perpendiculairement à ce plan, est parcouru par un courant induit qui va de l'Ouest à l'Est, dans la partie inférieure, si le mouvement a été fait de l'Est à l'Ouest, en passant par le Sud; car ce même courant parcourant le circuit, le ferait tourner précisément en sens contraire.

1727. MACHINES MAGNÉTO-ÉLECTRIQUES. — De même qu'on produit du magnétisme au moyen de l'électricité, de même on peut produire de l'électricité, par induction, au moyen des aimants. On a imaginé des appareils, nommés *machines magnéto-électriques*, au moyen desquels on développe cette électricité en assez grande quantité pour en obtenir tous les effets propres à cet agent tant à l'état statique qu'à l'état dynamique. Le premier appareil de ce genre a été construit par M. H. Pixii, en 1832.

Machine de Pixii. — Un aimant en fer à cheval *acb* (*fig.* 1289) peut tourner autour d'un axe vertical *co*, au moyen d'une roue *r* et d'un pignon denté.

Les pôles de l'aimant rasent, sans les toucher, les extrémités du fer doux d'un électro-aimant AB, dont le fil de cuivre est destiné à recevoir les courants induits. Les bobines de chaque branche se nomment ***bobines d'induction***. Quand les pôles *a* et *b* de l'aimant (*fig.* 1290) s'approchent des extrémités *c*, *c'* de l'électro-aimant, il se produit dans le fil de ce dernier, un courant induit de sens contraire aux courants de l'aimant. Ce courant augmente d'intensité à mesure que la distance diminue, et son maximum a lieu à l'instant où les pôles de l'aimant arrivent en face des extrémités *c*, *c'*. Les ordonnées de la courbe A*m*B peuvent servir à représenter ces variations d'intensité. — Quand les pôles s'éloignent ensuite en *a'b'*, il se produit un nouveau courant induit direct, par conséquent de sens contraire au précédent, dont l'intensité diminue à mesure que la distance augmente, comme le représehte la courbe B*n*C. Les pôles de l'aimant, aprés avoir tourné de 90°, s'approchent de nouveau des branches du fer doux, en *b"a"*, et produisent un courant induit négatif, mais de sens contraire au premier, A*m*B, parce que les pôles de l'aimant ont changé de place. Ce troisiéme courant est donc de même sens que le second B*n*C, dont il sera comme la continuation, et auquel il se superpose en partie, car le pôle *a'* se rapproche de *c'* en même temps qu'il s'éloigne de *c*, de sorte que le maximum d'intensité a lieu quand la ligne des pôles de l'aimant est perpendiculaire à celle de l'électro-aimant. La courbe B*o*D représente les intensités du courant provenant de la superposition des deux courants successifs, représentés séparément par les courbes B*n*C et C*p*D. Le courant induit qui aura lieu ensuite, au moment de l'éloignement des pôles, *b"'*, *a"'*, devant être de sens contraire au précédent, sera D*r*E, de même sens que le premier A*m*B. On voit donc qu'il y aura à chaque tour, quatre courants induits, les deux moyens marchant dans un même sens, et les deux extrêmes dans le sens opposé. Si donc la rotation est assez rapide pour qu'il n'y ait pas d'interruption sensible entre deux courants consécutifs de même sens, comme en B*o*D, et si l'on commence à compter les tours en B, au moment où l'aimant s'écarte de l'électro-aimant, on ne trouvera à chaque révolution que deux courants se succédant en sens contraire.

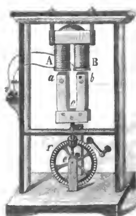


Fig. 1289.

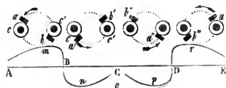


Fig. 1290.

Pour obtenir des étincelles électriques au moyen de cet appareil, on enfonce l'un des bouts du fil de l'électro-aimant dans un vase plein de mercure *v* (*fig.* 1289) pendant que l'autre bout affleure la surface de ce liquide légèrement agitée pendant le mouvement de rotation; et l'on voit jaillir de petites étincelles au point d'affleurement. — Si l'on prend dans ses mains mouillées avec de l'eau salée ou acidulée, des cylindres métalliques fixés aux extrémités du fil, on reçoit des commotions qui se répètent à chaque changement de sens du courant. — Si l'on ferme le circuit avec un voltamètre, l'eau est décomposée; seulement, comme le courant marche successivement dans les deux sens, on recueille à chaque électrode un mélange d'oxygène et d'hydrogène. Pour recueillir les gaz séparés, M. H. Pixii employait un commutateur analogue à celui d'Ampère (1683). La bascule était mise en mouvement par un excentrique fixé à l'arbre tournant, de manière à renverser le courant au moment où il changeait de sens autour de l'électro-aimant, et à lui conserver ainsi une direction constante dans la partie du circuit précédée par le commutateur. On emploie aujourd'hui le commutateur de M. Ruhmkorff, que l'on fixe à l'arbre tournant. Avec certaines précautions que nous indiquerons, on a pu charger un condensateur, et par conséquent obtenir de l'électricité statique par l'influence de l'aimant. Tous ces phénomènes se produisent plus facilement avec les appareils que nous allons décrire.

1728. Machines de Saxton et de Clarke. — Dans la machine de M. Saxton, l'aimant est fixe et horizontal, et l'électro-aimant tourne en présence des pôles de l'aimant, autour d'un axe horizontal auquel aboutissent les extrémités de son fil, ce qui donne le moyen de renverser facilement le courant. M. Clarke a perfectionné cet appareil, et lui a donné la forme sous laquelle il est représenté, en coupe et en perspective, dans la *fig.* 1291. A, A' est un fort aimant en fer à cheval, maintenu par une traverse *tt*, *t'* contre des vis, qu'on enfonce plus ou moins dans une table verticale TT, T', pour régler la position de l'aimant. *aa* est l'électro-aimant, mobile autour d'un axe horizontal qui passe entre les branches de l'aimant; *a'a'* est une coupe d'un autre électro-aimant à fil plus court, qui peut se substituer au premier. Les extrémités libres des branches de l'électro aimant rasent la surface de l'aimant; elles sont réunies par une bande de cuivre qui porte en son milieu une vis qu'on adapte à un écrou pratiqué dans l'axe *oo'*. Cet axe reçoit un mouvement de rotation, de la roue R, R' et d'une corde sans fin passant sur la poulie *p*. Les extrémités du fil de l'électro-aimant sont soudées, l'une à un arbre métallique *c*, *c'* fixé au milieu de la bande de fer *aa*, *a'a'*, qui forme la partie dorsale de l'électro-aimant, l'autre à un anneau métallique *α* séparé de l'arbre par une virole en ivoire. On peut fermer le circuit, en réunissant par un arc métallique l'anneau *α* à l'arbre *c*, *c'*.

Pour fermer le circuit, on a disposé, au-dessous du cylindre c, *c'*, deux plaques épaisses en laiton *n*, *n'*, isolées par une pièce de bois. Ces plaques portent des ressorts, dont un, *r*, s'appuie sur l'anneau *α*, et dont l'autre, *r'*,

communique avec l'arbre, directement ou par l'intermédiaire de pièces diverses fixées à cet arbre. De cette façon, les extrémités du circuit induit sont en *n* et *n'* ; on le fermera donc en réunissant ces deux plaques.

Commotion. — Pour éprouver la commotion de la machine de Clarke, on enfonce dans des trous pratiqués dans les plaques *n*, *n'*, des fils de cuivre *f*, *f'* terminés par des poignées en métal, ou *manipules*, M, M', que l'on prend dans les mains, mouillées avec de l'eau salée ou acidulée pour rendre l'épiderme conducteur. On éprouve une commotion à chaque changement de sens des courants induits. Mais, comme les mains et les bras conduisent assez mal, ces courants induits, et par suite les commotions, sont faibles. Pour les rendre

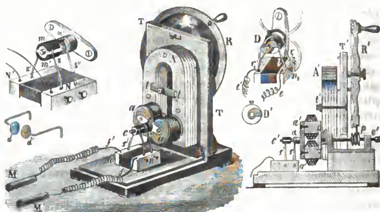


Fig. 1291.

plus intenses, les ressorts *r*, *r'* étant toujours en communication, l'un, *r*, avec l'anneau *α*, l'autre, *r'*, avec le cylindre *c*, on adapte à ce cylindre, au moyen d'une vis de pression, une pièce de rupture en métal, ou *disjoncteur*, représentée à part en D (*fig.* 1291). Une languette métallique *l* s'appuie sur le disjoncteur, qui est disposé de manière que la languette *l* cesse d'en toucher les parties renflées, au moment où les branches de l'électro-aimant arrivent dans la position verticale, ce qui a lieu deux fois à chaque tour. Alors le circuit est interrompu en *l*, et cela au moment où le courant induit est à son maximum d'intensité. Tant que la languette *l* touche le disjoncteur, le courant induit passe par r_1 n_1 *l*, trajet dans lequel il trouve peu de résistance ; mais, au moment où le circuit est interrompu en *l*, le courant, arrivé à son maximum d'intensité, n'ayant pas d'autre issue, se précipite dans l'arc de dérivation *e*, *e'* dont fait partie l'observateur, qui reçoit alors une forte commotion. La commotion se répète ainsi deux fois à chaque tour. Elle est très forte quand le fil de l'électro-aimant est long et fin, de manière à présenter une résistance, comparable à celle qu'oppose l'arc de dérivation. On donne ordinairement au fil,

de 1200 à 1500 mètres de longueur; les commotions sont alors insupportables, même quand les mains ne sont pas mouillées. Elles ont pour effet de contracter les muscles et de faire serrer involontairement les manipules. On en augmente le nombre et l'intensité en tournant plus vite, et on peut les faire éprouver à plusieurs personnes formant la chaîne. — Quand on veut communiquer la commotion à différentes parties du corps, pour les applications médicales, on remplace les manipules par des cylindres métalliques contenant des éponges mouillées avec de l'eau salée, que l'on applique sur la peau.

Actions chimiques. — Si l'on met les fils *f*, *f'* en rapport avec un voltamètre, l'eau est décomposée pendant la rotation. Mais, le courant changeant de sens à chaque demi-tour, il se dégage aux électrodes un mélange d'oxygène et d'hydrogène. Ces gaz y sont produits alternativement, et si l'on tourne trop vite, ils se recombinent et l'on n'obtient qu'un faible dégagement. Quand on veut obtenir les gaz séparés, il faut ne laisser passer que les courants d'un même sens; pour cela, on emploie le disjoncteur D' (*fig.* 1291), qui ne touche le ressort *l* qu'une fois à chaque tour. Il vaut encore mieux renverser l'un des deux courants qui se suivent, de manière à leur donner le même sens dans la partie du circuit qui contient le voltamètre. Pour cela, on adapte à l'arbre c, divers commutateurs. Le plus simple, représenté à part en *mm'* (*fig.* 1291), n'est autre chose que celui de M. Ruhmkorff (1683). L'une des bandes métalliques *m* communique avec l'anneau *α'* auquel aboutit l'une des extrémités du fil induit; l'autre, *m'*, par une vis de pression, avec l'arbre *c*, auquel aboutit l'autre extrémité de ce fil. Des ressorts *s*, *s'* s'appuient sur le cylindre d'ivoire, de manière à faire passer le courant dans les plaques N, N', quand ces ressorts touchent les bandes *m*, *m'*, et à le renverser au moment où il change de sens dans le fil induit, c'est-à-dire au moment où l'électro-aimant passe par la position horizontale.

Si l'on fixe aux plaques N, N', deux disques de platine *d*, *d'*, entre lesquels on interpose un morceau de papier de tournesol mouillé avec une dissolution saline neutre, le sel se décompose, et l'acide colore le papier.

Le commutateur *mm'* peut remplacer, pour les commotions, le disjoncteur D; il suffit pour cela d'ajouter un troisième ressort *s"*, qui s'appuie sur l'anneau *α'*, de manière que le circuit soit fermé par la plaque N quand la bande *m'* touche le ressort *s*, et que le courant ne trouve d'autre passage que le fil de dérivation, quand elle touche la bande *m*.

Manière d'obtenir de l'électricité statique. — On dispose sur l'arbre *c*, le disjoncteur D' (*fig.* 1291), et l'on fait communiquer un des fils *f*, *f'* avec l'armature extérieure d'une bouteille de Leyde; puis, pendant la rotation, on fait toucher, aussi rapidement que possible, au bouton de la bouteille, l'extrémité de l'autre fil tenu par un manche isolant, de manière à n'obtenir qu'une

[1] L'intensité de la commotion est augmentée par l'effet de ce que l'on appelle l'*extra-courant*, dont nous parlerons plus loin (1761).

seule étincelle. Si l'on cherchait à en obtenir plusieurs, on déchargerait la bouteille, dont les armatures communiqueraient par les fils de l'électro-aimant. On peut ensuite charger un électroscope, en le faisant communiquer avec l'armature intérieure.

Etincelle. — L'électro-aimant à long fil *aa* qui sert aux effets physiologiques et chimiques, et que l'on nomme *armature d'intensité*, ne convient pas pour obtenir les effets physiques. On emploie alors l'électro-aimant *a'a'*, nommé *armature de quantité*, dont le fer présente une plus grande masse, et dont le fil, plus gros, n'a que 40 mètres de longueur. Si l'on fixe à l'arbre *c'* de cet électro-aimant, le disjoncteur D, on distingue de petites étincelles à l'extrémité de la languette *l*, au moment où les parties renflées viennent la toucher. Pour en obtenir de plus fortes, on adapte aux fils *f*, *f'* des porte-crayons dans lesquels on fixe des pointes en plombagine, qu'on rapproche, et entre lesquelles on voit jaillir deux étincelles à chaque tour. Il vaut mieux encore enlever le disjoncteur et le remplacer par un système de deux pointes, *a* (*fig.* 1292), dirigées suivant les pôles de l'électro-aimant. Pendant le mouvement de rotation, ces pointes plongent dans du mercure contenu dans une petite coupe métallique *c* fixée à la plaque *n*, ainsi que le ressort *r*. Chaque pointe donne une vive étincelle au moment où, sortant du mercure, le circuit est rompu. Cette étincelle peut enflammer de l'éther versé sur le mercure.

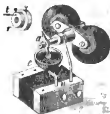


Fig. 1292.

Si l'on remplace l'anneau à pointe, par la virole métallique *r*, à laquelle on peut adapter des tiges *t* de divers métaux; et la coupe *c*, par un ressort terminé par le même métal, et touchant à chaque tour la tige *t*, on obtient de petites étincelles dont la couleur dépend de la nature du métal.

Actions magnétiques. — On dispose sur l'arbre *c*, le commutateur *mm'* (*fig.* 1291), et l'on fait communiquer les fils *f*, *f'* avec le fil d'un réomètre; l'aiguille est déviée pendant le mouvement de la machine. Si l'on remplace le réomètre par un petit électro-aimant, on peut lui faire porter des poids de plusieurs hectogrammes.

Actions calorifiques. — On fixe aux plaques *n'* et *n* (*fig.* 1291) des fils de cuivre, entre lesquels est tendu un fil de platine fin et court; ce fil rougit pendant que l'appareil tourne très vite. On opère, soit avec le commutateur *mm'*, soit avec le disjoncteur D. Si l'on fait passer les courants induits à travers l'hélice d'un thermomètre de Breguet, il indique aussitôt l'échauffement qu'il éprouve.

1729. Influence de la vitesse de rotation. — Quand on augmente la vitesse de rotation des machines magnéto-électriques, on modifie l'intensité des effets qu'elles produisent, non seulement parce que les courants induits se succèdent plus rapidement, mais encore parce que chacun d'eux augmente individuellement d'intensité, ce qui tient à la rapidité plus grande avec

laquelle l'aimant inducteur s'approche et s'éloigne des bobines d'induction. M. de La Rive a vu 462 courants induits dégager une certaine quantité de gaz quand il s'en produisait 28 par seconde, tandis qu'il en fallait 1050 pour dégager la même quantité de gaz, quand il n'y en avait que 14 par seconde. M. Wartmam a reconnu qu'il ne se produit plus de courants sensibles, quand le mouvement est très lent.

M. Lenz et M. de La Rive ont constaté aussi qu'il y a un maximum de vitesse au-delà duquel les effets diminuent. Ce maximum dépend de la résistance du circuit induit, et diminue quand elle augmente. Par exemple, M. Lenz ayant réuni bout à bout les fils de 6 bobines d'induction, de manière que le même courant les parcourût successivement, puis les ayant réunis, de manière que les courants induits se partageassent entre les six fils, trouva que, dans ce dernier cas, le maximum avait lieu, avec une vitesse de rotation beaucoup plus grande, et que l'intensité du courant induit était dix fois plus forte que dans le premier cas.

La rapidité plus ou moins grande avec laquelle le fer change d'état magnétique, influe aussi sur la vitesse qui correspond au maximum. On conçoit même que, s'il n'est pas parfaitement doux, il y aura une vitesse telle que, n'ayant pas le temps de s'aimanter et de rentrer à l'état neutre pendant chaque demi-tour, il n'y aura pas de courant induit.

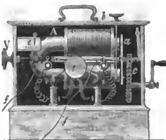


Fig. 1293.

1730. Appareil de M. Breton, etc. — L'appareil de Clarke, à cause de son volume et de son poids, est peu commode pour les usages médicaux. On a imaginé des appareils de moindres dimensions disposés spécialement pour donner des commotions. La *fig.* 1293 représente celui de M. Breton, dans lequel les courants sont excités par la méthode de M. Page (1702). Un barreau de fer doux *a* (*fig.* 1293) reçoit un mouvement rapide de rotation, en face des pôles d'un aimant A, au moyen d'une roue à manivelle et d'une chaîne sans fin *e*. Autour des branches de l'aimant, sont enroulés les fils induits. Quand on ne veut employer que les courants d'un même sens, on introduit dans le circuit, une roue *r* dont le contour est alternativement en bois et en métal, et qui reçoit son mouvement de rotation, de la manivelle. Ce mouvement est tel, que les courants d'un certain sens passent par les parties métalliques, tandis que les courants opposés sont interceptés par le bois. Pour graduer l'intensité des commotions, on éloigne plus ou moins l'aimant, du barreau tournant, au moyen d'une vis de rappel V; les distances sont indiquées sur l'échelle *e*. Une baguette en fer doux suspendue au bouton *b* peut aussi être appliquée latéralement aux pôles de l'aimant, de manière à amortir, par son magnétisme opposé à celui de

l'aimant, l'effet de ce dernier sur le fer tournant, et par conséquent l'intensité des courants induits. De plus, il y a deux fils enroulés sur les branches de l'aimant ; l'un gros et assez court, l'autre fin et beaucoup plus long, superposé au premier. Ces deux fils reçoivent, de l'aimant, des courants induits de même sens ; mais ceux du fil court donnent de faibles commotions, tandis que celles du fil fin sont très énergiques, et d'autant plus que le mouvement de rotation est plus rapide. L'appareil de M. Breton, simple et d'un emploi commode, est en usage dans les hôpitaux. Il peut arriver que l'aimant s'affaiblisse à la longue ; on lui rend sa première force en faisant passer le courant d'une pile en sens convenable, à travers le gros fil.

M. Duchenne a construit un appareil électro-médical analogue au précédent, et qu'il nomme appareil *magnéto-faradique*. L'aimant en fer à cheval est entouré de deux bobines superposées, l'une formée d'un fil de cuivre de $\frac{1}{2}^{mm}$ de diamètre et de 24 mètres de longueur, l'autre d'un fil de $\frac{1}{5}^{mm}$ et de 600 mètres. On peut utiliser à volonté les courants développés dans l'un ou l'autre de ces fils, par la rotation du barreau de fer doux. Un commutateur fixé à l'arbre tournant permet de n'utiliser, au besoin, que les courants qui vont dans le même sens. On fait varier la force des commotions, en rapprochant ou éloignant de l'aimant, au moyen d'une vis de rappel à tête divisée, le système du barreau de fer et de la roue qui sert à le faire tourner. On peut encore graduer l'intensité des commotions, par un moyen, imaginé par M. Dove, qui consiste à envelopper les bobines d'induction, de cylindres en cuivre que l'on peut retirer plus ou moins. Ces cylindres ont la propriété d'amortir les commotions en diminuant l'intensité des courants induits, par un effet d'induction analogue à celui que nous avons constaté en parlant de l'aimantation par les courants (1620), et dont nous donnerons l'explication plus loin.

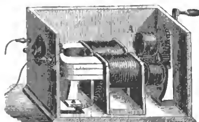


Fig. 1294.

MM. Gaiffe et Loiseau remplacent le barreau de fer tournant, par un électro-aimant A (*fig.* 1294), de manière à obtenir des courants induits, dans le fil de ce dernier. Ces courants peuvent être réunis à volonté à ceux qui se développent autour de l'aimant, et en augmenter ainsi l'effet.

1731. Machine d'induction par la terre. — On a fait beaucoup de tentatives pour obtenir les effets ordinaires de l'électricité dynamique, au moyen des courants induits par la terre. MM. Palmieri et Santi-Linari ont réussi les premiers, au moyen de l'appareil qui suit.

Batterie magnéto-électro-tellurique [1]. Des tubes de fer doux, bouchés

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. VIII, p. 503, et t. XV, p. 34.

par des cylindres de même métal sont fixés perpendiculairement à un arbre en bois, pouvant tourner, au moyen d'une roue et d'une corde sans fin. Un même fil de cuivre s'enroule en hélice sur ces tubes, en passant de l'un à l'autre, de manière à toujours former des hélices de même espèce. Les extrémités de ce fil sont fixées à un commutateur analogue à celui de la machine de Clarke. L'axe étant placé perpendiculairement au méridien magnétique, on peut, en le faisant tourner, produire des commotions, décomposer l'eau, et obtenir des étincelles.

Plus tard, M. Palmieri est parvenu à obtenir les mêmes résultats sans fer doux, au moyen de larges spirales tournant autour de leur diamètre placé perpendiculairement au méridien magnétique. Vers la même époque, M. Delezenne obtenait des commotions et des indices de décompositions chimiques, avec son cerceau (1725), en fixant à l'axe, un commutateur ou un disjoncteur analogues à ceux de la machine de Clarke.

1732. Applications des courants magnéto-électriques. — Les machines magnéto-électriques fournissent un moyen simple d'obtenir de l'électricité; mais à la condition de dépenser une certaine quantité de travail mécanique nécessaire pour les mettre en mouvement. Néanmoins elles nous présentent le moyen le plus économique d'obtenir de l'électricité, et l'on en a déjà fait plusieurs applications. En Angleterre, notamment à Birmingham, on utilise de puissants appareils, pour la galvanoplastie. On a aussi employé les courants magnéto-électriques pour décomposer l'eau et se procurer ainsi de grandes quantités d'hydrogène, que l'on combinait ensuite avec du carbone pour l'employer à l'éclairage. Les appareils qui furent établis pour cela, aux Invalides à Paris, sont des plus puissants. Ils se composent de six machines semblables, renfermant chacune 48 forts aimants distribués, par rangées de six, autour d'une roue en bois qui porte les bobines d'induction et des commutateurs disposés de manière à produire le renversement du courant 8 fois à chaque tour. On a renoncé à ce moyen de se procurer du gaz inflammable; mais le puissant appareil, mu par une machine à vapeur de 4 à 5 chevaux, fournit une quantité d'électricité capable d'entretenir simultanément plusieurs *arcs voltaïques*. C'est par ce moyen qu'on peut espérer de résoudre un jour le problème de l'éclairage économique par l'électricité.

II. Lois et théorie des courants d'induction.

1733. Après avoir fait connaître les faits de l'induction, il nous faut étudier les lois de ces phénomènes, c'est-à-dire chercher comment varient les intensités des courants induits, avec la distance à laquelle s'exerce l'induction, avec les dimensions des circuits induit et inducteur, etc. Dans les expériences que l'on fait à ce sujet, on a souvent besoin d'interrompre et de rétablir rapidement le courant inducteur, de ne recueillir que l'un des deux courants induits successifs en interrompant l'autre, ou bien enfin de renverser ce dernier, pour obtenir

dans une partie du circuit induit, des courants toujours de même sens. Les physiciens ont imaginé divers appareils destinés à remplir ces différentes conditions ; ils sont désignés sous les noms de *commutateurs*, *disjoncteurs*, *tachytropes*, *gyrotropes*, *réotropes*. Nous allons d'abord décrire deux de ces appareils.

1734. Réotrope de MM. Masson et Breguet [1]. — Cinq roues métalliques *a*, *b*, *c*, *d*, *r* (*fig.* 1295), garnies de dents égales dont les intervalles sont remplis par du bois, sont fixées à un même arbre tournant, et isolées les unes des autres. La roue *r* sert uniquement à interrompre le courant de la pile P. Le fil qui joint les pôles de cette pile s'enroule autour de la bobine B, en même temps que le fil induit *xy*. Les quatre autres roues, *a*, *b*, *c*, *d* sont affermies sur l'arbre tournant, de manière que les dents de bois des roues extrêmes se trouvent vis-à-vis des dents métalliques de celles du milieu. L'extrémité *x* du fil induit est fixée à une bande de métal *mn* qui porte deux ressorts *ma*, *nc* s'appuyant sur l'un des côtés des roues *a*, *c* ; et l'extrémité *y* communique avec une autre bande, *m' n'*, qui porte des ressorts *m'b*, *n'd* s'appuyant sur les roues *b*, *d*. D'autres ressorts, réunis deux à deux sur des plaques de métal *p*, *p*, s'appuient sur les contours des roues, et c'est à ces plaques qu'on fixe les extrémités de la portion M du circuit, dans laquelle on veut que des courants induits se succèdent toujours dans le même sens. Les ressorts *p*, *p* sont disposés de manière que ceux des roues *a* et *d* s'appuient sur du métal pendant que ceux des roues *b* et *c* s'appuient sur du bois, et *vice versâ*.

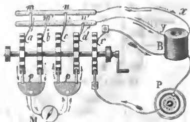


Fig. 1295.

Voici comment marcheront les courants en M, pendant la rotation du système. Supposons que le circuit inducteur se fermant, le courant induit parte de *x*, et que les ressorts des roues *a* et *d* s'appuient sur du métal, auquel cas les ressorts des roues *b*, *c* touchent du bois. Le courant suivra la direction des flèches, et retournera au fil *y*, par la roue *d*. Si les roues ont marché d'une dent, le courant inducteur sera interrompu en *r*, et le courant induit changera de sens en *xy*. Il partira donc de *y*, et suivra la direction des flèches ponctuées, car les ressorts qui touchaient des dents de métal reposent actuellement sur du bois, et réciproquement. On voit que le sens du courant restera le même en M.

Réotrope de M. Wartmann [2]. — Cet appareil se prête à toutes les combinaisons possibles. Trois roues métalliques R, S, T (*fig.* 1296), dont le contour porte 12 dents séparées par 12 morceaux de bois, sont fixées à un arbre métallique. La roue R communique avec cet arbre et avec le ressort *g* qui

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. IV, p. 133.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXII, p. 5.

le presse. Les deux autres roues sont séparées de l'arbre par des cylindres en ivoire enveloppés de viroles de cuivre sur lesquelles s'appuient les ressorts *e* et *h*. Les ressorts *e*, *h* et *g* communiquent avec trois cubes en métal munis de trous. Enfin, deux ressorts opposés *t*, *t'* ; *s*, *s'* ; *r*, *r'* s'appuient sur les contours de chaque roue, par l'intermédiaire de vis qui servent à faire varier la pression, et de manière que celui qui est en avant s'appuyant sur une dent de bois, celui qui est à l'opposé s'appuie sur du métal. On peut régler la position de ces ressorts, au moyen de vis à tête servant à les fixer par leur partie inférieure, qui est fendue pour qu'on puisse les relever plus ou moins. Les têtes de ces vis portent des trous, qui peuvent recevoir des fils métalliques. Enfin, les dents de bois de la roue du milieu alternent avec les dents de métal des deux autres.

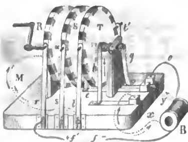


Fig. 1296.

Soit B la bobine d'induction, et *f*, *f'* les fils de la pile. La roue R servira à interrompre le courant inducteur, puisque le fil *f*B*o* communique par le ressort *g* et l'arbre, avec cette roue. Veut-on ne conserver que les courants directs dans le circuit induit, on fera communiquer les extrémités *x*, *y* de ce circuit, avec les ressorts *e* et *s*, de façon qu'il sera interrompu en α au moment où, le ressort *r* arrivant sur une dent de métal, il se produira un courant induit inverse; tandis qu'il sera ouvert au moment où se produira le courant direct. — Si l'on ne veut conserver que les courants inverses, on fera communiquer les extrémités *x* et *y* avec les ressorts *h* et *t*; le circuit induit sera alors fermé au même moment que le courant inducteur. On pourrait aussi se servir des ressorts *e* et *s*, en ayant soin de relever le ressort *s* de manière qu'il touche le métal en même temps que le ressort *r*; l'appareil pourrait donc n'avoir que deux roues. — Si l'on veut enfin que les courants induits de sens opposé parcourent, toujours dans le même sens, un fil M, on fera communiquer une des extrémités de ce fil avec les ressorts *s*, *t*, et l'autre, avec les ressorts opposés *s'*, *t'*, les extrémités *x*, *y* du fil de la bobine communiquant avec les ressorts *e* et *h*. Supposons que le courant induit inverse, engendré au moment où le ressort *r* arrive sur du métal, sorte de la bobine par l'extrémité *x* ; ce courant suivra le ressort *h*, la roue T arrivera au ressort *t* qui s'appuie sur du métal, et parcourra le fil M dans le sens de la flèche, puis le ressort *s'* opposé à *s* (ce ressort *s'* s'appuyant sur du métal pendant que *s* repose sur du bois), traversera la roue S, et enfin le ressort *e*, avec lequel communique l'extrémité *y*. Si le courant induit change de sens et sort par *y*, c'est que le courant inducteur s'interrompt, le ressort *r* touchant une dent de bois. Alors le courant passe par le ressort *e* dans la roue S, puis dans le ressort *s* qui s'appuie sur du

métal, parcourt le fil M, remonte par le ressort t', suit la roue T, et enfin le ressort h, dans la direction des flèches ponctuées.

1735. Comparaison des courants induits, par leurs divers effets. — M. Henry est le premier qui se soit occupé de rechercher les lois auxquelles sont soumis les courants d'induction. Il évaluait l'intensité de ces sortes de courants, par la commotion, l'étincelle, les actions chimiques, la déviation de l'aiguille du réomètre, ou enfin par l'aimantation d'une aiguille d'acier renfermée dans une hélice faisant partie du circuit induit[1]. Il a d'abord constaté que ces intensités sont soumises à des lois différentes, suivant qu'on les évalue au moyen de ces divers effets. Par exemple, le courant d'un couple étant lancé d'une manière intermittente dans une spirale, les courants induits dans une autre spirale formée d'un ruban de cuivre de 18 mètres de long donnaient des commotions extrêmement faibles ; cependant ils produisaient de petites étincelles, décomposaient l'eau et aimantaient une aiguille d'acier. La spirale induite ayant été remplacée par une autre formée d'un fil de 2422 mètres, les étincelles furent beaucoup plus faibles ; il n'y eut plus ni aimantation ni décomposition chimique, mais les commotions furent tellement fortes que 66 personnes purent les éprouver en même temps. Du reste, il y a un maximum de longueur du fil induit, d'autant plus élevé que sa section est plus grande, au-delà duquel les secousses vont en s'affaiblissant.

Pour expliquer ces différences d'actions, remarquons que l'action inductrice *totale*, ou la *quantité* d'électricité mise en mouvement dans le circuit induit, reste la même, comme nous allons le voir, pour des variations égales de la distance, ou de l'intensité du courant inducteur. Si donc la variation se fait rapidement, la même quantité q d'électricité traverse le circuit induit dans un temps plus court t ; sa *tension* I ou la *force électromotrice* est donc plus grande, car on a $q = tI$. Or certains effets (étincelle, déviation de l'aiguille, actions chimiques) dépendent de la *quantité* d'électricité qui passe dans un temps très court; tandis que d'autres (aimantation, commotion) dépendent de la *tension* et par conséquent de la rapidité du passage.

1736. La quantité d'électricité mise en mouvement est la même dans le courant induit inverse et dans le courant direct. — Si l'on compare les deux courants induits inverse et direct, au moyen de la déviation de l'aiguille aimantée, on les trouve égaux entre eux quand ils sont produits par des changements égaux de la distance ou de l'intensité du courant inducteur ; ce qui montre qu'ils contiennent des *quantités* égales d'électricité, circulant pendant un temps très court, mais qui n'est pas nécessairement le même pour tous les deux.

M. Matteucci a prouvé l'égalité des quantités d'électricité dans les deux courants induits direct et inverse, en faisant passer le courant d'une pile, par

[1] *Trans. de la Société phil. américaine*, t. VI et VIII ; et *Ann. de chimie et de physique*, 3e série, t. III, 394.

intermittences, au moyen de la roue R (*fig.* 1296) dans la bobine B, et faisant passer tous les courants induits à travers un voltamètre à sulfate de cuivre interposé dans le circuit induit xy. Il ne se fait aucun dépôt de cuivre, ce qui montre que les courants qui se succèdent dans les deux sens, se neutralisent mutuellement.

M. Matteucci et M. A. Lallemand ont prouvé le même principe au moyen des actions électro-dynamiques. Ce dernier physicien opérait avec la *balance électro-dynamique* (*fig.* 1297)[1]. C'est une balance de torsion dans laquelle est suspendu un fil de cuivre contourné en deux spirales *a*, *b* de sens contraire, de manière à annuler l'action terrestre. Les extrémités de ce fil plongent dans des coupes de mercure *c*, *c*, par lesquelles on fait arriver le courant induit. On présente à l'une des spirales, *a*, une troisième spirale réophore qui agit sur elle, et l'on cherche la torsion qu'il faut donner au fil pour maintenir à une distance constante, les spirales en présence. Si l'on fait passer dans ces spirales la même série de courants induits provenant, soit d'une machine de Clarke, soit d'une pile au moyen d'une roue dentée, il y a attraction ou répulsion, suivant que les courants sont de même sens ou de sens contraire dans les spirales en présence, dans lesquelles ils sont renversés au même moment. On obtient des résultats semblables quand, au moyen d'un réotrope, on ne laisse passer que les courants induits d'un même sens. Si la spirale fixe est parcourue par un courant continu, l'action est nulle quand la spirale mobile reçoit les courants inverses et directs ; et, quand ces courants passent isolément, il y a attraction ou répulsion, et l'angle de torsion qui les mesure est le même.

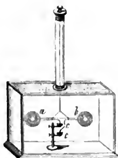


Fig. 1297.

1737. Comparaison des effets qui dépendent de la tension des courants directs et inverses. — Les courants induits inverses et directs produits par l'introduction et la suppression du courant inducteur, aimantent une aiguille d'acier d'une manière très différente ; ce qui tient à ce qu'ils ont des durées et, par conséquent, des tensions différentes. C'est le courant direct qui l'emporte ordinairement. Aussi, comme l'a reconnu M. Abria, quand on ajoute la résistance d'un fil à la spirale induite, on affaiblit dans une plus grande proportion le courant inverse que le courant direct.

Les effets calorifiques sont aussi plus intenses, avec les courants directs qu'avec les courants inverses, ce que l'on reconnaît en faisant passer le même nombre de courants inverses ou directs, dans un fil de platine enroulé autour de la soudure d'une pince thermo-électrique en communication avec un réomètre à fil court (1493).

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXII, p. 19.

Quand il s'agit de la commotion, les différences entre les courants directs et inverses dépendent de la tension du courant qu'on introduit et qu'on supprime dans le circuit inducteur. Ainsi, M. Henry trouve, avec les deux spirales citées ci-dessus (1735), qu'en employant un seul couple, le courant induit direct ou par rupture, donne une secousse forte, tandis que le courant inverse n'en donne qu'une très faible. Si l'on réunit successivement 2, 3, 4..... couples, la secousse du courant inverse augmente peu à peu, celle du courant direct variant à peine. Avec 10 couples, les commotions des deux courants induits sont les mêmes ; et avec 30, le courant inverse l'emporte notablement sur le courant direct. On arrive aux mêmes résultats en diminuant la résistance du circuit inducteur, soit en réduisant sa longueur, soit en augmentant sa section, la partie en hélice restant toujours la même. Ces résultats se conçoivent facilement, car la tension augmentant, ou la résistance diminuant dans le circuit inducteur, le courant, qui s'y propage de proche en proche, s'y établit plus brusquement, la durée de l'*état variable* étant moindre (1628). Il n'en est plus de même pour le courant direct, l'électricité existant d'avance dans le circuit inducteur quand on le rompt.

Il résulte de ce qui précède qu'il faut avoir grand soin, quand on énonce les lois relatives aux intensités des courants induits, d'indiquer par quels effets ces intensités sont comparées. Il y a même une distinction à faire relativement aux actions magnétiques, suivant qu'on observe la déviation de l'aiguille aimantée, ou les degrés d'aimantation communiquée à une baguette d'acier.

M. Abria, dans un beau travail sur les lois des courants induits, a employé principalement, pour en mesurer les intensités, l'aimantation d'une aiguille d'acier [1]. Il a d'abord constaté que le courant induit, produit en une seule fois le maximum d'aimantation dont il est capable ; car si l'on répète plusieurs fois l'expérience, la force magnétique de l'aiguille n'augmente pas. Bien entendu qu'on a soin de retirer cette aiguille de l'hélice, pendant le passage des courants inverses, qui alternent avec ceux qui l'aimantent. Du reste, les courants induits produits par l'introduction et la suppression du courant inducteur, ont une durée tellement courte que, si l'on introduit aussi promptement que possible l'aiguille d'acier dans l'hélice, après avoir fermé ou rompu le circuit inducteur, cette aiguille ne reçoit aucune trace d'aimantation. M. Abria déduisait la force magnétique de l'aiguille, de ses oscillations sous l'influence de la terre. Les aiguilles avaient 16^{mm} de long^{r} et 0^{mm},4 à 0^{mm},5 de diamètre ; avec ces dimensions, l'intensité des courants est proportionnelle à la force magnétique (1665), et varie par conséquent en raison inverse du carré de la durée de l'oscillation.

1738. LOIS DES COURANTS INDUITS. — Ces lois s'appliquent également aux courants inverses et aux courants directs ou de rupture, quand on mesure leurs intensités par les actions qui dépendent des quantités d'électricité et non des tensions.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. III, p. 5.

Influence de l'intensité du courant inducteur. — M. Abria a reconnu que *les intensités* des courants induits, données par le réomètre, sont *proportionnelles à l'intensité du courant inducteur*. Il en est de même quand on mesure les intensités, par l'aimantation d'une tige d'acier, pourvu que l'intensité du courant inducteur soit évaluée par le même moyen. Depuis, M. Félici a démontré cette loi, sans avoir à mesurer des intensités [1]. Il enroule sur un cylindre en bois, de 25 centimètres de diamètre environ, un fil de cuivre recouvert de soie, ne formant qu'un tour; c'est l'*anneau induit*, communiquant avec un réomètre, par des fils tordus ensemble. Cet anneau est placé entre deux autres semblables, qui sont les *anneaux inducteurs*. Un même courant, passant en sens contraire dans ces deux derniers anneaux, ne produisait dans celui du milieu aucun signe d'induction quand ils en étaient à égale distance. Ayant ensuite remplacé l'un des anneaux inducteurs par un faisceau de fils fins de cuivre, courbés en anneau et recouverts de soie, excepté en dehors de la partie circulaire, où ils étaient tordus ensemble de manière que le courant se partageât entre tous, il n'observa encore aucun courant induit dans l'anneau du milieu. Comme les effets produits par les différents fils fins s'ajoutent entre eux, on voit que, s'il y en a *n* dans lesquels l'intensité du courant de la pile est *n* fois plus petite que dans l'anneau d'un seul fil, il faut la réunion de ces *n* courants pour produire le même effet. M. Lallemand a constaté la même loi, au moyen de sa balance électro-magnétique (1736), en observant les intensités des actions électro-dynamiques exercées par un courant continu sur l'un des courants induits.

1739. Influence de la longueur du circuit inducteur. — 1° *L'intensité du courant d'induction mesurée par l'aimantation d'une aiguille, ou par le réomètre, croît proportionnellement au nombre des éléments agissants du courant inducteur*, quelle que soit la section de son fil, section dont l'action de chaque élément est indépendante; et cette *action est en raison directe de la quantité d'électricité qui traverse l'élément*. Pour établir ces lois, M. Abria disposait en spirale, un faisceau de quatre fils recouverts de soie, de manière à pouvoir diviser un même courant inducteur entre 1, 2, 3 ou 4 fils, représentant des circuits à section simple, double, triple ou quadruple, et il trouvait toujours la même énergie au courant induit, quand le courant inducteur était toujours ramené à la même intensité au moyen d'un réostat. Quand on n'employait pas de réostat, on trouvait, ce qui revient au même, que le rapport entre l'intensité du courant inducteur et celle du courant induit, restait le même. Si, au contraire, on faisait passer le courant inducteur dans les fils réunis bout à bout, de manière à former un circuit ayant successivement les longueurs 1, 2, 3, 4, l'intensité du courant induit était sensiblement proportionnelle au nombre de tours de la spirale inductrice, l'intensité du courant inducteur étant maintenue constante.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXIV, p. 64.

2° Quand l'induction est produite simultanément par plusieurs fils, les intensités des courants induits mesurées au réomètre sont, en général, égales à la somme ou à la différence des courants induits que produirait chacun des fils séparément, suivant que ces courants sont de même sens, ou de sens contraire. Pour établir cette loi, M. Wartmann enroulait sur une même bobine, deux fils inducteurs, et un fil induit partout placé entre les deux autres. — Il résulte de cette loi, 1° que les actions inductrices produites dans un même circuit induit ne s'influencent pas mutuellement, et que chacun des courants *inducteurs* reste soumis aux lois précédentes; 2° qu'un circuit traversé par un courant, subit l'induction de la même manière que s'il était à l'état naturel.

1740. Influence de la longueur de la résistance, etc., du circuit induit. — 1° *La résistance totale du circuit induit étant constante, l'intensité du courant induit est proportionnelle au produit des portions actives des circuits induit et inducteur, c'est-à-dire de celles qui agissent l'une sur l'autre.* — M. Félici, qui a trouvé cette loi [1], employait deux cylindres égaux en bois, sur chacun desquels étaient enroulés deux fils de cuivre représentant, l'un le circuit induit, l'autre le circuit inducteur. Le courant d'une même pile parcourait les deux circuits inducteurs, et les deux courants induits circulaient en sens inverse dans les deux fils d'un réomètre différentiel. Si n et m sont les nombres de tours des fils sur le premier cylindre, et n', m' ces nombres sur le second, les courants induits se contrebalancent dans le réomètre différentiel, quand on a $mn = m'n'$. Comme l'intensité des courants inducteurs est proportionnelle au nombre de tours du circuit inducteur (1739), on voit que cette intensité est aussi proportionnelle au nombre des tours du circuit *induit*.

Cette loi montre que chaque élément actif des deux circuits ajoute son action à celle des autres éléments, et que l'intensité du courant induit est produite par la somme des actions inductrices de tous les éléments actifs. — M. Abria ayant pris pour spirale induite, la spirale à 4 fils citée plus haut (1739), trouva qu'une aiguille aimantée par le courant induit, présentait une force proportionnelle au nombre des fils communiquant par leurs extrémités avec l'hélice magnétisante, pourvu que les fils ne communiquant pas avec elle formassent toujours un circuit fermé; tous les fils recevaient des courants induits sensiblement de même intensité, et les courants des fils qui communiquaient avec l'hélice ajoutaient leurs effets pour aimanter l'aiguille.

2° *L'action inductrice entre deux éléments, varie en raison inverse de la simple distance.* — Pour le prouver, M. Félici dispose deux anneaux égaux, perpendiculairement à la droite qui joint leurs centres. Il fait passer le courant inducteur dans un de ces anneaux, et mesure l'intensité du courant induit développé dans l'autre. Il recommence ensuite l'expérience, en mettant les anneaux à une distance n fois plus grande, et, afin que les distances de tous les éléments deux à deux, varient dans le même rapport n, il emploie des

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXIV, p. 64.

diamètres n fois plus grands. D'après la première loi, l'intensité du courant induit, avec les anneaux plus grands, devrait être, s'il n'y avait pas l'influence des changements de distance, n^2 fois plus grande. Or l'expérience montre que cette intensité est seulement n fois plus grande; en rendant la distance n fois plus grande, on rend donc l'effet n fois plus petit qu'il ne serait sans ce changement.

4° Quand la partie induite reste la même, l'intensité du courant induit varie en raison inverse de la *résistance totale* du circuit induit. — Cette intensité est donc proportionnelle à la conductibilité et à la section du fil induit, et en raison inverse de sa longueur totale (1615). — Comme l'intensité du courant induit est proportionnelle, d'après la première loi, à la longueur de la partie induite, on voit que l'intensité du courant induit sera indépendante de la longueur du circuit induit quand l'induction s'exercera sur toute la longueur; c'est en effet ce qu'a constaté M. Abria. — On voit aussi que le diamètre du fil induit n'aura aucune influence, si la résistance totale du circuit induit reste constante.

1741. Conséquences. — M. Gaugain qui a vérifié la plupart des lois qui précèdent, est arrivé à l'énoncé qui suit[1] : L'*intensité d'un courant induit est en raison directe de la somme des forces électromotrices mises en jeu, et en raison inverse de la somme des résistances du circuit.* Il résulte de là que la loi de Ohm s'applique aux courants induits, et l'on aura pour l'intensité d'un de ces courants $i = E : R$, formule dans laquelle R représente la résistance du circuit induit, et E la somme des actions inductrices élémentaires.

Quand on connaît R et qu'on a mesuré i, on peut évaluer E en fonction de l'intensité I du courant inducteur et du temps t pendant lequel a lieu l'induction. En effet, la quantité d'électricité mise en mouvement dans le circuit induit est $q = it$; (1735), cette quantité est proportionnelle à l'intensité I du courant inducteur, et à la longueur, et par conséquent à la résistance de la partie induite C; on a donc aussi $q = \mathrm{CIR}$, C étant une constante qui dépend de la distance à laquelle s'exerce l'induction. Substituant dans $q = it$, il vient $\mathrm{CIR} = it$, d'où $i = \mathrm{CIR} : t$ et par suite $E = iR = C\,\frac{IR^2}{t}$; formule qui montre que : 1° *La force électromotrice d'induction est proportionnelle au carré de la résistance du circuit induit.* Un circuit dont la partie induite présente une grande résistance peut donc être comparé à une pile à grand nombre de couples, la partie non induite représentant le fil conjonctif de cette pile; — 2° La valeur de E est en raison inverse de la durée de l'induction, ce qui nous explique les différences d'effets du courant inverse et du courant direct.

1742. Formule de la force d'induction. — M. Félici a donné l'expression analytique de la force électromotrice d'induction exercée par un élément de courant sur un élément d'un circuit fermé. Il commence par démontrer que l'on

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XXXIX, p. 909 et 1023.

peut, sans modifier les effets, substituer à une très petite portion d'un courant inducteur, une portion courbe très petite, se terminant aux mêmes points. Pour prouver directement cette loi, qui est une conséquence du 5e principe d'Ampère (1689), M. Félici plaça un anneau induit, à égale distance de deux anneaux inducteurs parallèles, dont un était formé de petites sinuosités, et fit passer le courant d'une même pile par intermittences et en sens contraire dans les deux anneaux inducteurs. Il constata alors que l'anneau du milieu n'était parcouru par aucun courant induit. — Ce principe s'applique également au circuit induit.

Il résulte de là que l'action inductrice d'un élément de courant ds, sur un élément induit ds' est proportionnelle à $ds.ds' \cos\alpha \cos\alpha'$, en représentant par α et α' les angles que font les deux éléments, avec la droite qui joint leurs milieux. Nous avons vu en outre (1740), que la force d'induction varie en raison inverse de la simple distance. La force électromotrice élémentaire sera donc représentée par la formule

[1] $$e = k \frac{ds \,.\, ds'}{r} \cos\alpha \cos\alpha'$$

La constante k dépend de l'intensité du courant inducteur et de la résistance du circuit induit.

1743. Influence de la disposition en spirale. — Les deux fils induit et inducteur, entourés de soie, étant juxtaposés, les courants induits sont généralement plus intenses quand ces fils sont disposés en hélice, au lieu de former une ligne droite. Par exemple, M. Gaugain [1] ayant enroulé le double fil de diverses manières, a trouvé les intensités suivantes pour le courant induit.

		Déviation du réomètre.
Le double fil formant :	1° Une seule circonvolution	3°,50
	2° Deux circonvolutions superposées	6,17
	3° Un toron circulaire de 4 tours	10,66
	4° Un toron de 15 tours de 0m,27 de diamètre	28,55
	5° Un toron de 30 tours de 0m,14 de diamètre	29,87
	6° Une hélice de 80 tours, de 0m,05 de diamètre	28,86

On voit que, pour les diamètres suffisamment grands, l'intensité est à peu près proportionnelle au nombre de tours, chacun de ceux du circuit inducteur agissant à peu près également sur *tous* ceux du circuit induit. Mais, pour les petits diamètres, l'intensité des courants induits finit par diminuer quand le nombre de tours augmente. M. Gaugain explique ce résultat, en remarquant que, si l'on suppose la circonférence inductrice partagée par un diamètre parallèle à un élément induit, les actions des deux demi-circonférences sur cet élément, sont de signe contraire, et varient, avec le diamètre, suivant des lois différentes. On conçoit donc que la différence de ces actions, d'autant plus petite que le

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XXXIX, p. 1023.

diamètre est moindre, puisse devenir nulle, et même changer de signe quand le diamètre diminue beaucoup.

1744. Influence des lames et des spirales interposées. — M. Henry a reconnu qu'une plaque métallique *n* (*fig.* 1298) interposée entre une spirale inductrice, *a*, et une spirale induite, *b*, rend presque insensibles les commotions produites par la première, et les amortit d'autant mieux que la plaque est plus épaisse, et la distance des deux spirales plus grande. Une plaque non conductrice n'a aucune influence. L'affaiblissement produit par une plaque métallique est dû à un courant induit qui s'y développe et y circule dans le même sens que le courant du circuit induit *a*. Le courant de la plaque agit sur ce dernier circuit (car les courants d'induction produisent eux-mêmes des courants induits, comme nous le verrons bientôt (1749), et tend à y engendrer un courant inverse, c'est-à-dire de sens contraire à celui que produit la spirale *b*. En effet, M. Henry a constaté qu'une spirale mise à la place de la plaque, agit comme elle et d'une manière très marquée, quand ses bouts sont réunis, et ne produit plus d'effet quand ces bouts sont séparés. De plus, si l'on enlève un secteur de la plaque interposée entre les spirales *a*, *b*, cette plaque n'affaiblit plus le courant induit. On ne peut attribuer ce résultat à ce que l'effet se transmet à travers la fente ; car si l'on superpose deux disques fendus, mais dont les fentes ne se correspondent pas, leur effet est encore nul. Enfin, si l'on soude aux bords de la fente, un fil métallique *f*, *f'*, s'enroulant autour d'une aiguille d'acier, celle-ci est aimantée de manière à indiquer un courant de même sens que le courant induit en *a*. Quand la plaque est placée *au-dessus* de la spirale induite *a*, au lieu d'être entre *a* et *b*, son influence se fait encore sentir, mais d'une manière moins prononcée.

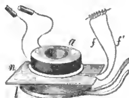


Fig 1298.

Ces résultats nous donnent l'explication de l'effet des conducteurs interposés, sur l'aimantation par la décharge (1664), et de celle des enveloppes métalliques pour affaiblir les courants induits dans les appareils magnéto-électriques (1730).

M. Abria a fait, sur l'influence des spirales interposées, des expériences qui l'ont conduit à admettre que l'induction ne se fait sentir qu'après un temps qui dépend de la distance du conducteur induit [1]. Trois spirales A, B, C sont superposées et maintenues à des distances égales, B étant entre les deux autres. L'intensité du courant induit dans une quelconque des spirales, par l'une quelconque des deux autres (intensité mesurée par l'aimantation d'une aiguille d'acier), est à très peu près la même quand la troisième est ouverte, la différence de distance étant insensible. Si la troisième spirale est fermée,

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. I, p. 385.

il y a un affaiblissement du courant induit, par la cause que nous venons d'expliquer. Quand c'est la spirale du milieu, B, qui reçoit le courant inducteur, cet affaiblissement est sensiblement le même dans les spirales A et C ; mais si c'est la spirale A qui sert d'inductrice, le courant induit en C est beaucoup plus affaibli que celui de B. M. Abria explique cette différence, en admettant que l'action de A ne se transmet à C qu'après s'être fait sentir sur B. C reçoit donc simultanément les actions contraires du courant inducteur de A et du courant induit de B. Mais la spirale B ne reçoit l'action contraire du courant affaibli de C, qu'après un temps double de celui qui a été nécessaire pour que l'action se transmette de B à C. Le courant induit par A dans B, a donc eu le temps d'aimanter l'aiguille, avant d'être affaibli par l'action de C.

M. Abria a retrouvé ces mêmes résultats en évaluant l'intensité des courants induits, par la commotion, les effets calorifiques et les effets chimiques ; mais le réomètre en donnait de tout différents. Pour les commotions, il ouvrait et fermait fréquemment le circuit inducteur, au moyen d'une roue dentée. Les effets calorifiques étaient obtenus en faisant passer dans un fil fin, au moyen du réotrope, un grand nombre de courants induits de même sens. La température du fil était donnée par la pince thermo-électrique. La déviation du réomètre de cet instrument croissait en raison du carré de l'intensité du courant inducteur, du carré du nombre des éléments inducteurs, et de la vitesse de la roue dentée. Les effets calorifiques des courants induits paraissent donc varier suivant les mêmes lois que ceux des courants voltaïques (1526). Pour les effets chimiques, les courants induits de même sens étaient lancés à travers une bande de papier toujours de mêmes dimensions, imbibée d'iodure de potassium et posée sur les extrémités de deux fils de platine fixes. La tache d'iode qui se formait sur le fil négatif, indiquait la présence du courant induit, et, par sa teinte, donnait une idée de l'intensité de ce courant.

1745. Induction par un circuit de très-grande longueur. — Nous avons remarqué que l'état définitif d'un circuit dans lequel on lance un courant, est précédé d'un état variable, appréciable dans les très longs circuits (1628). MM. Guillemin et Burnouf ont prouvé que c'est pendant cet état variable que le courant produit l'induction. M. Guillemin est même parvenu à évaluer les intensités des courants induits, engendrés à chaque instant de l'état variable, et dont la somme constitue le courant induit définitif [1]. Pour cela, il emploie l'appareil déjà décrit plus haut (1628) (*fig.* 1299) : une bobine inductrice est introduite dans le circuit $mLL'T$; sur la même bobine s'enroule le circuit induit, auquel est empruntée la dérivation *vrdd'o*. En opérant comme il a été expliqué plus haut (1628), on laisse passer le courant dérivé, pendant $\frac{1}{1000}$ de seconde, par la lame δ, et quelques dix-millièmes de seconde après la fermeture du courant inducteur, et, par conséquent, après le commencement du courant induit. L'appareil faisant 15 tours par seconde, ce qui

[1] *Recherches expérimentales sur l'induction volta-électrique*, Montpellier (1861).

donne 15 courants dérivés, les impulsions que reçoit l'aiguille du réomètre sont assez rapprochées pour qu'elle prenne une position fixe, qui fait connaître l'intensité du courant induit au moment considéré. — Pour le courant induit de rupture, les choses étaient disposées de manière que la lame δ touchât le ressort *d* quelques dix-millièmes de seconde après la rupture du circuit inducteur.

Nous avons vu (1628), que pendant l'état variable, le courant près de la pile va en décroissant d'intensité, tandis qu'il va en croissant près de l'extrémité qui communique avec le sol; on devrait donc trouver un courant induit *direct* quand la bobine d'induction est placée près de la pile, et un courant *inverse*

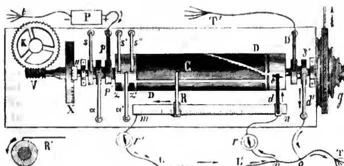


Fig. 1299.

quand elle est placée près de l'extrémité opposée du fil inducteur. D'un autre côté, le courant commençant pour toutes les parties du fil, on devrait trouver partout un courant induit *inverse*. Il y a donc contradiction, et l'expérience seule pouvait décider. Or, l'expérience montre que, près de la pile, le courant induit est d'abord *inverse*, puis *direct* jusqu'à la fin de l'état variable. Voici quelques-uns des résultats obtenus par M. Guillemin, près de la pile, avec deux bobines dont les fils avaient 600 et 300 mètres, et dans l'intérieur desquelles on pouvait introduire 100 et 60 baguettes de fer doux. Le signe (—) indique les courants inverses.

Temps en $\frac{1}{1000}$ de seconde.	0,2	0,5	1,3	3,4	4,8	6,7	10,9	15,4
1. Bobine de 600m........	—15°	—32°	18°	3°	1°,5	0°,5	0°,3	0°
2. Id. avec fer doux..	—64	—64	—54	—22	—3	7	7,5	2
3. Bobine de 300m........	—38	15	15	1,5	0,7	0 5	0,2	0
4. Id. avec fer doux..	—70	—63	—43	?	9	10	4,5	0,5
5. Id. Id.	—41	—36	—27	—11	—4	?	1	1

Les résultats de la 5e série ont été obtenus avec la bobine de la 4e; seulement, il y avait un fil de fer de $\frac{1}{5}$ de millimètre de diamètre et de 1000m de

longueur entre la pile et la bobine. La courbe *bst* (*fig.* 1301), dont les abcisses représentent les temps, et les ordonnées les intensités, traduit les résultats de la 5e série, et la courbe *brt* ceux de la 4e. La courbe *am* représente l'état variable dans le fil inducteur.

Voici maintenant comment M. Guillemin rend compte de ces résultats singuliers : Soit AB (*fig.* 1300) le fil inducteur, dont l'extrémité B communique avec le sol. Quand on fait communiquer l'extrémité A avec le pôle positif d'une pile, au premier instant il s'établit, dans tous les points de ce fil, des *tensions*, représentées par les ordonnées de la courbe H *m* B ; quelques dix-millièmes de seconde après, par celles de la courbe H *n b*, puis par H *p* B, H *r* B,.... ; et enfin par la droite HB, quand le courant a atteint son état définitif. L'intensité du courant, dans un élément, *ab*, du fil, est proportionnelle à la *chute électrique*, ou à la différence *ca—mb* (1619). Cette différence varie, pour cet élément, d'un

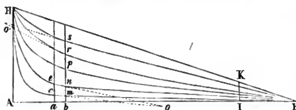


Fig. 1300.

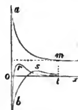


Fig. 1301.

instant à l'autre, c'est-à-dire d'une courbe à l'autre. D'abord, elle va en augmentant, les tangentes *mo* et *no* se rencontrant à droite ; alors le courant inducteur augmente d'intensité en *ab*, et le courant induit est *inverse*. Plus tard, la chute électrique diminue, comme le montrent les tangentes *ro'*, *so'*, qui se rencontrent vers la gauche, et le courant induit devient alors direct jusqu'à la fin de l'état variable, après lequel il n'y a plus d'action inductrice.

1746. Comparaison de l'induction par un circuit fixe, à l'induction par déplacement du fil inducteur. — M. Félici a établi la loi suivante [1] : *Quand on approche peu à peu un courant inducteur, d'un circuit fermé, la somme des courants, induits dans ce dernier par chaque déplacement infiniment petit du courant inducteur, est égale au courant induit qui serait produit, dans la position d'arrivée, par la clôture ou la rupture du circuit inducteur ;* la position d'où part ce dernier étant supposée assez éloignée pour qu'il ne puisse produire de courant induit quand on le ferme ou qu'on le rompt. Pour établir cette loi, on approche le courant inducteur, assez rapidement pour que tous les courants induits successifs aient lieu presque simultanément, de manière que l'aiguille du réomètre reçoive leurs impulsions réunies avant d'avoir le temps de revenir sur ses pas, et l'on compare la déviation observée, à

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXIV, p. 64.

celle que produit le courant induit par la rupture ou la clôture du circuit inducteur, dans sa position la plus rapprochée. Voici comment M. Félici a réalisé cette expérience : il prend trois roues en bois portant une gorge sur le contour, et une rainure diamétrale sur l'une des faces. Sur chacune de ces roues, il enroule un fil de cuivre, de manière qu'après s'être enroulé sur la moitié de la circonférence, il traverse la rainure pour s'enrouler sur l'autre moitié en sens contraire, en formant comme un 8, et il lui fait faire ainsi plusieurs tours. Considérons deux roues semblables A et M assemblées sur un même axe perpendiculaire à leur plan et passant par leurs centres; l'une, A, porte le circuit inducteur; l'autre, M, porte le circuit induit, en rapport avec un réomètre. Si, les rainures diamétrales de A et M étant perpendiculaires l'une à l'autre, l'on ferme ou l'on rompt le circuit inducteur A, il n'y a pas de courant induit dans M; car l'induction donne des courants de sens contraire dans les deux moitiés de la partie diamétrale, ainsi que dans les deux moitiés de chaque demi-circonférence. Si donc, en partant de cette position, on fait tourner la roue M, de 90°, pendant que le courant inducteur est continu, il y aura un courant induit en M. Si on le fait encore tourner de 90°, on aura un autre courant induit de sens contraire au premier, et si le mouvement de rotation est continu, ces courants se succèderont alternativement dans un sens et dans l'autre. On pourra, au moyen d'un réotrope tournant avec la roue M, ne laisser arriver au réomètre que les courants d'un même sens; et, si le mouvement est assez rapide, l'aiguille indiquera la somme des courants produits par chaque déplacement infiniment petit de la roue M, dans l'angle de 90°. On compare cette déviation à celle qui se produit quand on ouvre et qu'on ferme le circuit inducteur A, les rainures diamétrales étant parallèles, et l'on trouve la même déviation.

Au lieu de procéder ainsi, M. Félici a employé la méthode décrite plus haut (1739), qui évite les mesures d'intensité. Il dispose sur le même arbre une troisième roue A′, de manière que la roue induite M soit entre les deux autres, et il la place à une distance telle, que, les trois rainures diamétrales étant parallèles, il n'y ait pas de courant induit en M quand on introduit ou qu'on supprime le courant d'une même pile circulant en sens contraire en A et A′. Quand les circuits A et A′ sont identiques, M doit en être à des distances égales. Cela fait, et le courant de la pile passant d'une manière continue, on fait tourner la roue M, et l'on remarque qu'il ne s'y produit pas non plus de courant induit.

Tout ce qui précède s'applique à l'induction par les aimants, puisque les aimants représentent des systèmes de courant (1711).

1747. EXPLICATION ET THÉORIE DES COURANTS D'INDUCTION. — M. Weber a appliqué à l'explication des courants induits, les considérations par lesquelles il a cherché à rattacher les actions mutuelles des courants, aux attractions et répulsions électriques ordinaires (1701). M. Newmann a traité la même question en partant d'un point de vue différent. M. de La Rive, sans recourir comme eux à des calculs élevés, a présenté d'une manière simple et élégante l'explica-

tion de l'induction électro-dynamique, en la considérant comme le résultat d'une décomposition par influence, de l'électricité neutre des particules du circuit induit[1].

1. Cas du circuit inducteur fixe. — Considérons une série de molécules AB (*fig.* 1302) dans laquelle on lance un courant; il s'y fait dès-lors des décharges intermoléculaires (1599); en vertu desquelles les molécules sont maintenues dans un état permanent de polarisation, par les électricités qui affluent continuellement des pôles de la pile. On peut donc les supposer chargées constamment des deux électricités, comme le montre la figure. Supposons qu'on approche le courant AB, d'un conducteur à l'état neutre A'B'. Dans chacune des particules *a*, *b*..., le fluide neutre va être décomposé par influence, par les fluides séparés de la particule de AB la plus rapprochée; et cela aura lieu dans toutes les parties de A'B' assez rapprochées de AB, pour éprouver l'induction. Quant aux molécules *n*, *m*..., *m'* *n'*..., qui sont en dehors de la partie induite, elles seront polarisées par les actions des électricités de nom contraire; des molécules extrêmes *m*, *m'* de la partie induite, se déchargeront mutuellement, et formeront ainsi, dans la partie non induite A'BC' du circuit fermé, un courant instantané marchant en sens contraire du courant inducteur.

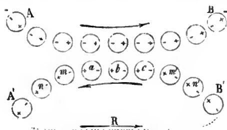


Fig. 1302.

Si le circuit n'est pas fermé, on ne pourra évidemment constater ce courant induit; mais les extrémités *m*, *m'* du fil induit seront chargées d'électricités contraires, au moyen desquelles on pourra charger un condensateur (1728), ou produire une étincelle si l'interruption est très petite. Comme le courant induit direct, ou par rupture, est plus intense que le courant inverse, il donne des étincelles à une plus grande distance que le dernier. C'est, en effet, ce qu'a constaté Masson[2], et l'on peut faire en sorte que les courants directs puissent seuls passer par étincelles, de manière qu'un voltamètre placé dans le circuit induit présente alors la décomposition dans le sens qui convient à ces courants directs.

Remarquons que la partie non induite du circuit *m*R*m'*, rentre immédiatement à l'état neutre; mais la partie induite *mm'* reste polarisée, et n'est pas parcourue par un courant, les électricités s'y trouvant retenues à l'état d'équilibre, sous l'influence des molécules de AB. C'est ce que M. Faraday avait admis dès le prin-

[1] *Traité d'électricité théorique et appliquée*, t. I, p. 445.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LII, p. 418.

cipe, et il désignait cet état sous le nom d'*état électro-tonique*. Supposons maintenant qu'on supprime le courant inducteur, les molécules polarisées en *mm'* vont aussitôt revenir à l'état neutre ; mais celles qui sont aux extrémités *m*, *m'* de la partie induite, n'ayant plus qu'une seule électricité, positive en *m'* et négative en *m*, ces fluides vont se réunir à travers la partie *m*A'RB'*m'*, en y formant un courant instantané de sens contraire à celui qui s'est manifesté au moment de la naissance du courant inducteur, et, par conséquent, de même sens que ce dernier. On voit maintenant pourquoi la résistance du fil induit se fait sentir plus sur le courant inverse que sur le courant direct (1740); c'est que le premier doit, pour s'établir, vaincre toutes les résistances du circuit, tandis que le courant direct, dû à la décharge des molécules polarisées à l'avance dans tous les points de la partie induite, n'a à vaincre que la résistance de la partie non induite.

II. Cas du courant inducteur mobile. — Si le courant inducteur est rapproché peu à peu du circuit induit, le courant d'induction sera continu ; les électricités séparées par influence dans la partie induite augmentant graduellement, et les décharges aux extrémités de cette partie induite, continuant alors à fournir un écoulement d'électricité dans la partie extérieure *m*R*m'*. La tension du courant induit sera d'autant plus grande que le mouvement sera plus rapide, la même quantité d'électricité circulant en R dans un temps plus court. Si le mouvement était très lent, le courant continu existant en R, pourrait être assez faible pour n'être pas perceptible ; il semblerait donc n'y avoir pas de courant induit. C'est pourquoi M. Wartmann a pu approcher jusqu'au contact, en allant très lentement, une spirale inductrice, d'une autre spirale, sans apercevoir de courant induit dans cette dernière.

III. Induction par les courants instantanés. — Courants induits de différents ordres.

1748. Les courants induits produits par la fermeture et par la rupture du courant inducteur étant de sens contraire, on doit se demander ce qui aurait lieu si le courant inducteur cessait immédiatement après avoir commencé, c'est-à-dire s'il était instantané. Les premières expériences à ce sujet, ont été faites par M. Henry, de Princeton [1], d'abord en prenant pour courants inducteurs, des courants induits de durée insensible, ensuite au moyen de la décharge de la bouteille de Leyde. Nous allons considérer d'abord les courants induits développés par d'autres courants induits.

1749. Courants induits de différents ordres. — M. Henry disposa un certain nombre de spirales, de la manière suivante : la spirale *a* (*fig.* 1303) reçoit le courant inducteur venant d'une pile. Ce courant est appelé du *premier ordre*. Tout près de la spirale *a* s'en trouve une autre, *b*, dans laquelle le cou-

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. III, p. 394.

rant inducteur, au moment où il est lancé ou supprimé en *a*, développe un courant induit nommé *courant du second ordre*, ou *courant induit primaire*, et qui est soumis aux lois que nous avons examinées précédemment. Ce courant induit *instantané*, parcourt la spirale *c*, et développe, dans l'hélice *d*, un autre courant induit, dit *courant du troisième ordre*, ou *courant induit secondaire*. Celui-ci parcourant à son tour l'hélice *m*, agit sur la spirale *n* et y développe un *courant du quatrième ordre*, ou *courant induit tertiaire*; et ainsi de suite. L'aimantation d'une aiguille d'acier dans une hélice *e*, permet d'étudier le sens et l'intensité des courants induits des divers ordres, courants qui ne produisent pas de déviation appréciable sur le rêomètre, à partir du courant induit secondaire. M. A. Lallemand a constaté avec sa balance électro-dynamique, que le courant du troisième ordre agit, au contraire, vivement sur lui-même, soit par attraction soit par répulsion.

M. Henry a reconnu au moyen de l'aimantation d'une aiguille d'acier, que les *courants induits par des courants induits, produisent l'aimantation d'une aiguille d'acier, comme s'ils étaient de sens contraire à ces derniers.* Par exemple, le



Fig. 1303.

courant induit primaire produit en *bc* par la fermeture du circuit inducteur *a*, étant négatif, le courant secondaire agit comme s'il était positif, le courant tertiaire, comme s'il était négatif, et ainsi de suite.

M. Abria a vérifié cette loi jusqu'au courant du 7e ordre [1]; au delà, le courant induit était trop faible pour produire des effets. Il a reconnu, en outre que, toutes circonstances égales d'ailleurs, le rapport entre les intensités de deux courants induits consécutifs, mesurées par l'aimantation, reste sensiblement constant. Pour que les deux spirales dont il comparait les courants induits fussent dans des conditions identiques, il opérait avec les deux dernières d'une série disposée comme dans la *fig.* 1303, en faisant passer le courant de la pile successivement dans le premier, le second.... des circuits qui précédaient les deux derniers, de manière que le courant induit dans la dernière spirale fût successivement secondaire, tertiaire....

1750. Explication des courants induits des différents ordres. — M. Henry, après avoir constaté l'action presque insensible sur le rêomètre, des courants induits d'ordre supérieur au courant primaire; tandis que ces courants produisent des effets physiologiques énergiques et aimantent fortement des aiguilles d'acier, a montré que le courant induit secondaire est formé de deux

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. III, p. 59.

courants se succédant très rapidement, l'un inverse, quand le courant induit primaire est excité, l'autre direct quand il cesse presque aussitôt. Ces deux courants étant égaux *en quantité* (1736), leurs effets sur le réomètre se neutralisent; mais comme ils sont inégaux en durée, et par suite en tension, une aiguille d'acier est aimantée dans le sens du plus intense, qui est ici le courant inverse, contrairement à ce qui a lieu pour les courants induits primaires. Quant aux effets physiologiques, ils sont d'autant plus énergiques, qu'il y a là deux courants de sens contraire se succédant très rapidement.

M. Abria a confirmé cette théorie, par des expériences faites avec le réomètre. Il fit d'abord communiquer cet instrument avec le fil d'une spirale soumise à l'induction d'un courant intermittent obtenu au moyen d'une roue dentée; il trouva que l'aiguille aimantée, sous l'influence des courants induits primaires alternativement de sens contraire, était dans un état d'équilibre instable, et se déviait d'une même quantité, d'un côté ou de l'autre indifféremment. Si les deux courants successifs devaient vaincre une résistance, comme celle que présente la roue d'un réotrope, ou franchir une interruption en donnant une étincelle, le courant direct l'emportait toujours; c'est que ayant une plus grande tension que le courant inverse, il franchit plus facilement les obstacles. M. Poggendorff a aussi constaté les mêmes résultats. Or, M. Abria ayant employé une troisième spirale, induite par une succession de courants induits primaires, directs ou inverses, observa tous les phénomènes que nous venons de décrire ; ce qui montre que le courant induit *secondaire* est aussi formé de deux courants successifs de sens contraire. Quand on opère sur le courant *tertiaire*, on trouve des résultats peu constants; ce courant étant formé de quatre courants successifs : deux produits par le courant secondaire inverse quand il commence et quand il cesse, les deux autres par le courant direct qui le suit. Il est à remarquer que les deux courants moyens sont de même sens, et peuvent être considérés comme n'en formant qu'un seul.

M. Verdet démontre l'existence des deux courants qui composent le courant *secondaire*, en le faisant passer à travers un voltamètre ; il trouve à chacun des électrodes, un mélange d'oxygène et d'hydrogène [1]. Ce résultat a lieu, que les courants secondaires soient produits par les courants induits primaires directs ou inverses isolément, ou par ces deux espèces de courants réunis, mais ramenés au même sens au moyen du réotrope. Les deux volumes de mélange étaient, du reste, inégaux et variables d'une expérience à l'autre, à cause de la recomposition partielle des gaz aux surfaces des électrodes. Avec l'appareil employé, il fallait de 20 à 30 mille interruptions du courant de la pile, pour obtenir 1 centimètre cube de gaz dans chaque éprouvette. Un barreau de fer doux ayant été introduit dans la bobine du courant induit secondaire, il n'en fallut plus que 2 à 3 mille. — Masson a confirmé ces résultats en prenant la précaution d'employer des fils de platine très fins ; il a obtenu des mélanges

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXIX, p. 501.

explosifs purs ; ce qui montre une fois de plus que les quantités d'électricité sont égales dans les courants directs et inverses. Enfin, M. Matteucci, en constatant que les courants induits *secondaires* ne produisent aucune décomposition dans une solution de sulfate de cuivre, a apporté une nouvelle preuve de l'existence presque simultanée des deux courants dans le courant secondaire.

1751. INDUCTION PAR LA DÉCHARGE — Aimé paraît avoir le premier obtenu l'induction électro-dynamique au moyen de la décharge d'une bouteille de Leyde. Ayant collé sur les deux faces d'une lame de verre, des bandes d'étain opposées, il vit des étincelles à toutes les solutions de continuité d'une de ces bandes, qui formait un circuit fermé, quand il déchargeait une bouteille de Leyde à travers la bande opposée. M. Henry, après avoir obtenu des courants d'induction au moyen des courants induits, eut l'idée d'essayer les effets de la décharge[1]. Il enveloppa un cylindre de verre, de deux hélices, l'une à l'extérieur, l'autre à l'intérieur, et ayant fait passer la décharge d'une bouteille à travers l'hélice extérieure, il obtint dans l'hélice intérieure un courant induit, ou *décharge induite*, dont il reconnut la présence, par l'aimantation d'une aiguille d'acier, par une étincelle jaillissant entre les extrémités du fil induit, ou enfin par la commotion. Deux spirales plates superposées et séparées par une lame de verre, lui donnèrent les mêmes résultats. Ce qu'il y a de singulier, c'est que la commotion peut être à peine sensible avec une forte décharge, et très prononcée avec une décharge beaucoup plus faible.

La décharge induite peut, du reste, être produite à une distance surprenante : M. Henry a pu, au moyen d'une simple étincelle de 3 centimètres de longueur, lancée d'une machine électrique, sur l'extrémité du fil d'un circuit placé dans une chambre, obtenir dans un autre circuit placé dans une cave, à 10 mètres de distance, un courant induit capable d'aimanter une aiguille d'acier. C'est au courant induit réagissant sur le fil dans lequel passe la décharge, qu'il faut attribuer l'affaiblissement de celle-ci par un fil voisin de celui dans lequel elle passe (1335).

La découverte de l'induction par la décharge était aussi faite vers la même époque par MM. Masson, Riess, Matteucci, et Marianini qui appelle courants *leyd-électriques* les courants produits par la décharge. La *fig.* 1504 représente un appareil construit par ce dernier physicien, au moyen duquel les expériences se font avec facilité. Deux plateaux en verre A et B, que l'on peut rapprocher plus ou moins l'un de l'autre, portent sur leur face intérieure une spirale formée d'un fil de cuivre recouvert de soie et enduit de gomme laque. Les extrémités de chaque spirale aboutissent à des boutons extérieurs placés, l'un au centre, l'autre près du bord de chaque disque. On décharge la bouteille en *aa'* à travers l'une des spirales, pendant que les extrémités du fil *f*, *f* de la spirale opposée

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. III, p. 403.

communiquent avec les appareils que doit traverser le courant induit. Cette disposition peut aussi servir pour produire des courants induits par la pile ; il est bon alors que les fils soient plus gros et moins longs.

1752. Du sens de la décharge induite. — La décharge induite se compose de deux courants instantanés, l'un *inverse* quand la décharge inductive agit, l'autre direct, quand elle cesse. Si l'un de ces courants a plus de durée que l'autre, il est plus faible, ce dernier prédomine, et détermine le sens de la décharge induite.

M. Henry ayant produit des courants induits de différents ordres, avec des hélices fixées à l'extérieur et à l'intérieur de tubes de verre, les trouva tous de même sens. Avec des spirales planes, les courants induits furent alternativement dans un sens et dans le sens opposé, comme avec les courants voltaïques. M. Henry avait d'abord attribué ces anomalies à la différence de distance des circuits inducteur et induit. M. Marianini en a trouvé la véritable explication[1]. Il a reconnu, en se servant de son *réélectromètre* (1678), que les causes qui ralentissent la décharge tendent à donner au courant induit un sens inverse à celui du courant inducteur, tandis que le courant induit est de même sens, quand le circuit inducteur n'offre que peu de résistance, ou que la tension est assez forte pour la vaincre facilement. Ainsi, une grande jarre *fortement chargée* produit un courant induit de *même sens* que le courant leyd-électrique qu'elle fournit ; elle produit un courant de sens contraire, quand elle est faiblement chargée, ou que le circuit inducteur est très long, ou renferme des parties non métalliques. Une petite bouteille, quoique fortement chargée, produit aussi un courant inverse. Ces résultats semblent dépendre de ce que le courant leyd-électrique, s'introduisant brusquement, développe un courant induit inverse intense, tandis que cessant graduellement quand il y a résistance, le courant induit direct dure davantage, et par conséquent est plus faible.

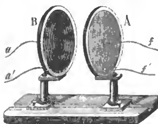


Fig. 1304.

M. Matteucci, après avoir constaté, au moyen du réomètre, que l'*intensité* de la décharge induite augmente avec la tension et avec la surface armée de la batterie, a trouvé que le sens du courant induit[2] dépend aussi de la disposition des circuits inducteur et induit, qui peuvent être continus, ou présenter une solution de continuité dans laquelle il se produit une étincelle. Quand le circuit induit était continu, le courant était observé avec le réomètre ; quand il y avait interruption, cet instrument ne donnant que des résultats

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. X, p. 498.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. IV, p. 153.

incertains, ou même nuls, M. Matteucci faisait jaillir l'étincelle, à une distance de 2^{mm} à travers un morceau de papier ajusté dans le perce-carte. Le sens du courant était indiqué par la position du trou, qui est toujours tout près de la pointe négative (1336). Voici la loi trouvée par cette méthode :

Quand les circuits sont tous les deux fermés en même temps, ou tous les deux ouverts de manière à donner une étincelle, le courant induit est de sens contraire au courant inducteur. Mais, si l'un des circuits est ouvert et l'autre fermé, le courant induit est de même sens que l'inducteur.

Le courant leyd-électrique étant nécessairement ouvert au point où part l'étincelle, M. Matteucci, pour se procurer un courant inducteur dans un circuit fermé, a eu recours aux courants de différents ordres, au moyen de spirales échelonnées. La *fig.* 1305 indique, comme exemple, le sens des courants induits dans diverses hélices présentant ou ne présentant pas une solution de continuité. Dans les couples de circuits *a*, *b*, et *c*, *d* qui sont dans le même cas, les courants inducteur et induit sont de sens contraire ; dans les circuits *b* et *c*, dont un seulement présente une solution de continuité, ils sont de même sens. Une simple bouteille de Leyde suffit pour avoir des étincelles de 2^{mm} de longueur dans une série de 4 spirales.

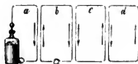


Fig. 1305.

M. Riess a cherché le sens du courant induit par la décharge, au moyen d'un condensateur, des plateaux duquel il approchait les extrémités du fil induit. Mais cette méthode présentant beaucoup de difficultés, il a procédé de la manière suivante[1] : on place entre les extrémités terminées en pointe, du fil induit, un plateau de métal dont les faces sont recouvertes d'une mince couche de poix-résine. Les électricités, arrivant par les extrémités du fil, se répandent sur la couche résineuse. Pour en reconnaître la nature, on projette sur chaque face, le mélange de soufre et de minium qui sert dans l'expérience des figures de Leichtemberg (1351). Les deux poudres se séparent et affectent des dispositions différentes sur les deux faces. La distance des pointes, les dimensions de la plaque, l'intensité de la décharge, la distance des fils induit et inducteur, et leur conductibilité, ne changent rien à la position relative des figures. M. Riess ayant ensuite déterminé un certain nombre de fois la direction de la décharge, au moyen du condensateur, et reconnu quelle est la relation entre cette direction et la position des figures sur l'une et l'autre face, crut pouvoir conclure de leur observation, que le courant induit est toujours de même sens que le courant de la décharge. Mais il reconnut plus tard que, l'aspect des figures restant le même, le condensateur indiquait parfois un sens différent pour le courant induit.

M. Knochenhauer a trouvé, au contraire, que le courant induit est de sens

[1] *Ann. de ch. et de phys.*, 2e série, t. LXXIV, p. 158, et 3e série, t. XXVI, p. 378.

contraire au courant de la décharge. Il évaluait l'intensité du courant induit, par l'échauffement du fil de platine d'un thermomètre électrique (1333) interposé dans le circuit induit, et il jugeait de la direction de ce courant, en faisant passer un courant continu dans le fil de l'instrument, admettant que le courant induit est de même sens que ce dernier quand il augmente l'effet calorifique, et de sens contraire quand il le diminue. Mais M. Matteucci a constaté que les effets calorifiques produits par un courant continu et par la décharge d'un condensateur, s'ajoutent toujours quand on les fait passer simultanément dans un fil. D'un autre côté, l'une des armatures d'une batterie contient de l'électricité libre qui, en circulant dans le fil de communication, peut produire dans un fil voisin une *décharge latérale* (1335), qui peut être confondue avec un courant induit. Cette électricité libre peut aussi occasionner des erreurs, avec les méthodes de M. Riess, surtout quand on se sert du condensateur. La seule méthode qui semble à l'abri de toute objection, est celle de M. Verdet, dont il nous reste à parler.

1753. Sens de la décharge induite déterminé par la polarisation des électrodes. — M. Henrici ayant reconnu que la décharge d'un condensateur à travers un liquide, polarise les lames de platine par lesquelles on la produit, M. Verdet a tiré parti de ce fait pour trouver le sens de la décharge induite[1]. Il fait passer le courant induit, dans un liquide, par l'intermédiaire de lames d'or ou de platine, qui sont polarisées par les dépôts résultant de l'électrolyse du liquide. Ces lames peuvent ensuite donner un courant de sens contraire à celui qui les a polarisées, et d'autant plus intense que la quantité d'électricité qui les a traversées est plus grande. M. Verdet se servait de spirales verticales disposées comme celles de l'appareil de la *fig.* 1304. Les spirales induites étaient formées d'un fil de $0^{mm},5$ de diamètre, et de 28 mètres de longueur formant 24 tours. Les spirales destinées à recevoir la décharge inductrice étaient formées de 48^{m} d'un fil de cuivre de 1^{mm} de diamètre, faisant 95 tours. La batterie, composée de 9 jarres, se déchargeait d'elle-même sur un électromètre de Lane (1319).

M. Verdet a reconnu que : 1° lorsque la spirale induite ne présente pas de solution de continuité, le courant induit est de même sens que l'inducteur, comme l'avait trouvé M. Matteucci. Seulement, pour obtenir des traces de polarisation assez prononcées, il faut employer les plus fortes décharges. Cependant, avec les faibles décharges, le courant induit, exploré par les effets magnétiques ou par la commotion, présente une grande intensité. *Les deux courants qui se succèdent dans le circuit induit continu, correspondent donc, comme dans le cas des courants voltaïques, à des quantités égales d'électricité.* 2° Si le circuit induit est interrompu en quelque point, la polarisation est, en général, assez forte, et le sens du courant induit dépend de la grandeur de l'interruption, et de la forme des conducteurs au point

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXIV, p. 377.

de séparation. Si l'étincelle d'induction part entre la pointe d'une vis micrométrique verticale et une surface de mercure, le courant induit *direct* l'emporte sur l'*inverse*, quand le premier va de la pointe au mercure, quelle que soit sa distance à ce liquide; et l'intensité du courant induit croît rapidement avec cette distance. Mais quand le courant direct marche vers la pointe, ce n'est qu'à partir d'une certaine distance qu'il l'emporte sur l'autre et que la décharge induite est de même sens que le courant inducteur et augmente d'intensité avec la distance; au-dessous, le sens de la décharge induite varie irrégulièrement, ainsi que son intensité. 3° S'il y a dans le circuit induit, deux interruptions, et deux vis micrométriques, par l'une desquelles arrive toujours le courant direct, les résultats sont, pour toute distance, ceux que nous avons énoncés dans le cas où le courant direct arrive par la pointe. La distance des spirales, leur conductibilité, la charge de la batterie et le sens de la décharge, n'ont pas d'influence sur ces phénomènes. M. Verdet conclut de là que l'interruption affaiblit plus le courant induit inverse que le courant direct. Cela explique, non seulement le sens de la polarisation, mais encore ses variations d'intensité; car le courant inverse ne pouvant avoir la même intensité pendant toute sa durée, une partie seulement est arrêtée par l'interruption, et cette partie est d'autant plus grande que l'intervalle à franchir est plus considérable. Tout obstacle qui tend à affaiblir l'effet total d'induction, tendra donc à faire prédominer le courant induit direct. Quant à l'influence de l'espèce d'électricité qui arrive par la pointe, quand il n'y a qu'une seule interruption, il suffit pour s'en rendre compte de se rappeler qu'un courant passe plus facilement, d'une pointe à une surface métallique, que dans le sens opposé (1532). Du reste, M. Verdet a constaté par des expériences directes, que la distance maximum que peut franchir la décharge induite, est plus grande quand le courant direct qui en fait partie arrive par la pointe, que lorsque c'est le courant inverse qui se trouve dans ce cas.

M. Verdet est arrivé aux mêmes conclusions, en étudiant la décharge induite secondaire produite par la décharge induite primaire. Il considère cette décharge secondaire comme formée de quatre courants, dont les deux moyens sont de même sens. Ces courants sont sensiblement égaux, et leur réunion ne produit pas d'effet quand le circuit ne présente pas de résistance. Mais une interruption ou tout autre obstacle, fait prédominer les courants d'un certain sens, le plus souvent les courants directs, et cela dépend aussi de plusieurs circonstances, comme la forme des extrémités du conducteur interrompu, la distance, l'intensité de la décharge. On peut rapprocher ces phénomènes de ceux que nous avons signalés antérieurement en parlant de l'écoulement différent des deux électricités par les pointes (1287). Il semble aussi, d'après les expériences de M. Marianini (1752), que si, au lieu d'obstacles à franchir, le circuit présente seulement une plus grande résistance tout en restant continu, c'est le courant inverse qui doit prédominer.

M. Buff a répété avec soin les expériences de M. Verdet, et il est arrivé

aux mêmes résultats [1]. Ainsi, quand la décharge induite est accompagnée d'une étincelle, la polarisation des lames de platine indiquait un courant de même sens que la décharge principale. De plus, M. Buff a pu renverser le sens du courant induit, en réunissant les lames de platine par un fil de dérivation, présentant une petite interruption terminée par de petites boules entre lesquelles la décharge induite passait en partie, en donnant une étincelle. Si l'on rapprochait peu à peu ces boules, la polarisation diminuait, disparaissait, puis reprenait sa direction primitive. Il y avait donc bien deux décharges induites ; d'abord, la décharge directe avait la plus grande intensité et franchissait plus facilement l'interruption du circuit ; mais si l'on établissait le fil de dérivation, le courant direct passait aussi plus facilement entre les boules, et le courant inverse prédominait dans le voltamètre. M. Buff a obtenu les mêmes résultats, en remplaçant le voltamètre par un réomètre.

1754. Expériences de Masson. — Ces expériences, destinées principalement à prouver l'égalité des quantités d'électricité dans les courants direct et inverse, ont été faites avec des spirales disposées comme celles de la *fig.* 1304. La batterie, dont la surface a varié de 9 à 26 décimètres carrés, était chargée au moyen de la bobine de Ruhmkorff, appareil électromoteur dont nous parlerons plus loin (1770), de manière que les éprouvettes recevaient de l'oxygène et de l'hydrogène dans les proportions qui forment l'eau. L'aiguille d'un réomètre introduit dans le circuit induit n'était pas déviée. S'il y avait une interruption, l'aiguille était déviée, et les gaz étaient séparés dans le voltamètre, de manière à indiquer la prépondérance du courant *direct*. Au moyen de l'œuf électrique contenant de l'air convenablement raréfié, on peut aussi arrêter le courant le plus faible. On reconnaît, aux auréoles qui entourent les boules, si les deux courants passent à la fois, ou si l'un d'eux est intercepté. — Des expériences semblables faites sur les courants induits *secondaire* et *tertiaire*, ont donné les mêmes résultats : seulement, quand il y avait interruption, c'était le courant inverse qui l'emportait.

1755. Influence des lames interposées, sur la décharge induite. — Cette influence s'exerce de la même manière que pour l'induction par les courants voltaïques, et elle est due à la même cause. MM. Matteucci et Masson ont reproduit à ce sujet les expériences de M. Henry. Le premier a aussi opéré avec un appareil, qu'il nomme *inductionomètre différentiel*, composé de deux spirales identiques, placées parallèlement, à une même distance de part et d'autre d'une spirale inductrice. Les fils des spirales induites s'enroulent autour d'une aiguille d'acier, de manière que les courants induits, marchant en sens contraire, s'y neutralisent s'ils sont égaux. Or, une lame métallique placée près de l'une des spirales induites, fait que le courant de l'autre devient prépondérant. Des lames de verre, soufre, résine, n'altérent pas l'égalité des courants induits.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXIX, p 502.

1756. INFLUENCE DES MÉTAUX PLACÉS DANS L'INTÉRIEUR DES BOBINES. — M. Dove a fait un grand nombre d'expériences pour reconnaître l'influence des masses métalliques introduites *dans l'intérieur* de la bobine autour de laquelle sont enroulés les fils induit et inducteur. Il a opéré avec des métaux magnétiques et non magnétiques [1]; il nomme *inducteur différentiel* l'appareil dont il a fait principalement usage dans ces expériences.

Inducteur différentiel. — H et H' (*fig.* 1306) sont des hélices parfaitement identiques enroulées sur des tuyaux en carton, et dont les spires sont isolées avec soin au moyen de gomme laque. Ce sont les hélices induites; elles sont portées par des colonnes de verre. Le fil qui les forme passe de l'une à l'autre en *n*, et ses extrémités libres sont en *f*, *f'*, où l'on place les appareils destinés à éprouver les effets de la décharge induite. Deux autres hélices *h*, *h'*, formées d'un gros fil de cuivre faisant 80 tours sur deux tubes de verre de 33 centimètres de longueur et de 2cm,5 de diamètre, sont introduites dans l'intérieur des premières; elles communiquent entre elles par le fil *m*, et sont destinées à recevoir la décharge inductrice de la batterie, avec laquelle on les met en relation par les boutons *c* et *a*. On peut introduire dans les tubes de verre différents corps métalliques. Les hélices induites H, H' sont réunies de manière que les courants induits qui s'y développent marchent en sens contraire, et se neutralisent s'ils sont égaux. Si l'introduction de masses métalliques dans l'une d'elles y modifie l'induction, l'équilibre n'a plus lieu, et l'on obtient des effets plus ou moins intenses, aux extrémités *f* et *f'*.

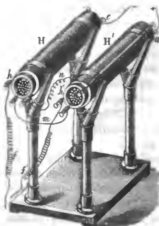


Fig. 1306.

M. Dove a fait avec cet appareil, ou avec des spirales planes disposées d'une manière analogue, de nombreuses expériences sur les courants induits par les *courants voltaïques et thermo-électriques*, et a comparé l'influence que les métaux introduits exercent sur ces sortes de courants induits, à celle qu'ils exercent sur la *décharge induite*.

1757. Influence des métaux non magnétiques sur les effets physiologiques. — La décharge induite ne donne pas de commotion quand les hélices sont vides; mais si l'on introduit un barreau d'un métal non magnétique dans l'une d'elles, sa présence détermine une commotion en *f*, *f'*; ce barreau modifie donc le courant induit, dans l'hélice qui le contient. Or,

[1] *Ann. de ch. et de ph.*, 3e série, t. IV, p. 336, et *Arch. de l'élect.*, t. II, p. 290.
[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LII, 421.

les figures sur la résine (1752) prouvent que le sens du courant prédominant est celui qui correspond à l'hélice vide ; les métaux introduits *diminuent* donc les effets physiologiques de l'induction. On remarque que les métaux les meilleurs conducteurs agissent avec le plus d'efficacité ; ainsi, la commotion est plus vive avec le *cuivre* qu'avec l'*antimoine*, le *bismuth*, le *plomb*.

Un fil de cuivre enroulé en hélice et introduit à la place du barreau, ne produit aucun effet, tant que ses extrémités sont séparées ; mais il agit comme une masse de cuivre, s'il forme un circnit fermé. Si cependant ce fil forme deux hélices inverses superposées, il n'agit plus, quoique ses extrémités soient réunies. Ces résultats s'expliquent facilement : l'hélice simple et fermée est parcourue par un courant induit réagissant sur l'hélice extérieure H, de manière à neutraliser en partie l'effet de la décharge inductrice ; et quand le fil intérieur forme deux hélices inverses, elles sont parcourues par des courants opposés, dont les actions s'entre-détruisent. Les masses métalliques agissent aussi, par les courants induits qui les parcourent ; car des solntions de continuité dans le sens de la longueur atténuent beaucoup leur effet. C'est ainsi qu'un faisceau de fils métalliques dûment isolés, ou un tube fendu suivant un arête, n'ont plus qu'une influence très faible.

Dans le cas des courants induits par les *courants voltaïques*, les masses des substances non magnétiques n'exercent aucune influence.

1758. Influence des corps magnétiques. — Des barreaux de fer, d'acier trempé ou non, de fonte grise ou blanche, *diminuent* l'effet physiologique du courant induit, dans l'hélice qui les renferme ; car la commotion se produit, et le sens du courant est celui qui correspond à l'hélice vide. Des faisceaux de lames d'acier ou de fer-blanc séparées ou non par des substances isolantes, agissent de la même manière, mais moins fortement. Il suffit même d'une différence de nature dans deux barreaux de fer de mêmes dimensions, pour que leurs effets soient inégaux ; car leur présence simultanée dans les deux hélices *h* et *h'* détruit l'équilibre et laisse prédominer l'un des courants induits, de manière à agiter vivement des membres de grenouille fraîchement préparés. Un barreau de nickel agit aussi, mais faiblement ; et le courant a le sens qui correspond à l'hélice qui le renferme ; le nickel augmente donc un peu l'induction, tandis que le fer la diminue.

Quand l'induction est produite par un *courant voltaïque*, l'intensité du courant induit est toujours *augmentée* par la présence d'un barreau de fer, à cause du magnétisme qui s'y développe (1723) ; c'est que, avec les corps magnétiques, il se produit, comme le remarque M. Dove, deux phénomènes distincts : 1° le développement du magnétisme dans le barreau, qui ajoute son effet au courant inducteur pour augmenter le courant induit ; 2° le développement de courants induits dans ce barreau, lesquels agissent pour affaiblir le courant de l'hélice induite. Ce dernier effet l'emporte sur le premier dans le cas de la décharge, parce que le magnétisme, qui ne se développe pas instantanément, n'a pas le temps de prendre une grande intensité pendant la durée excessivement courte de la

décharge, et les courants induits directs qui se développent dans le fer au moment où elle cesse, l'emportent sur l'effet contraire dû au retour du barreau à l'état neutre magnétique. Dans le cas des courants voltaïques, le magnétisme du fer a le temps de se développer, et son effet l'emporte sur celui des courants induits dans ce métal.

1759. Effets des faisceaux de fil de fer. — Pour rendre prépondérants les effets physiologiques du magnétisme développé par la décharge, M. Dove remplace le barreau de fer par des fils de fer isolés les uns des autres, à travers lesquels il ne peut s'établir de courants. Alors le courant induit dans l'hélice qui contient le faisceau, l'emporte sur celui de l'hélice vide. Quand les fils sont un peu gros, chacun d'eux agissant comme un petit cylindre, on conçoit qu'il y en aura qui ne produiront aucun effet, leur action magnétique étant égale à celles que produiront les faibles courants induits qui pourront s'y développer; ce qui est confirmé à l'expérience.

Si le faisceau de fils fins est enveloppé d'un tube de cuivre, ou d'une hélice simple à bouts réunis, il se comporte comme un barreau massif; c'est-à-dire que la décharge induite reprend le sens qui appartient à l'hélice vide. Si le tube de cuivre est fendu suivant une arête, ou l'hélice simple interrompue, ou enfin si, étant continue, elle est formée de deux parties superposées de sens inverse, le faisceau de fil de fer agit comme s'il n'était pas enveloppé. Son effet est à peine diminué, si l'hélice simple à bouts réunis est en argentan, à cause de la faible conductibilité de cet alliage.

Dans le cas des courants voltaïques, les solutions de continuité longitudinales exaltent singulièrement l'accroissement que produisent les métaux magnétiques sur les effets physiologiques des courants induits. Aussi, l'inducteur différentiel donne-t-il de violentes secousses quand, l'une des hélices renfermant un barreau de fer, l'autre contient un faisceau de fils de fer, même d'un moindre poids. Les enveloppes de cuivre ou de fils de cuivre en hélice, agissent de la même manière que pour les courants par la décharge.

Les propriétés des fils de fer donnent le moyen de comparer les effets des divers métaux; pour cela on les introduit dans l'un des tubes de l'inducteur différentiel, et l'on cherche à neutraliser leur influence par des fils de fer égaux introduits dans l'autre tube. Il est évident que le métal qui augmente le plus l'effet, est celui qui exige, pour neutraliser son influence, le plus grand nombre des fils de fer pris pour terme de comparaison. On peut aussi, par le même moyen, reconnaître si un métal augmente ou diminue le courant induit. Si l'introduction de fils de fer dans le tube opposé peut rétablir l'équilibre, c'est que le métal augmentait l'intensité du courant induit; quand, au contraire, les fils de fer augmentent l'effet, c'est que cette intensité était diminuée; si l'on veut alors rétablir l'équilibre, il faut remplacer les fils de fer par des fils de cuivre.

1760. Action des masses métalliques intérieures, sur les effets non physiologiques. — Nous n'avons considéré, dans ce qui précède, que les effets physiologiques. Les résultats restent les mêmes, pour les effets de la

décharge induite sur l'aimantation des aiguilles d'acier; mais ils sont tout différents quand on observe l'action exercée sur le réomètre, et les effets chimiques et calorifiques. Ainsi, un barreau métallique, magnétique ou non, introduit dans l'une des hélices de l'inducteur différentiel traversé par la décharge, ne produit aucun effet sur le réomètre, ni sur l'aimantation du fer doux, ni sur les actions chimiques; tandis que la commotion, le condensateur, les figures sur la résine indiquent un affaiblissement de l'induction dans l'hélice qui reçoit le barreau, et que l'aimantation de l'acier indique au contraire une augmentation. Les effets calorifiques, observés en faisant passer la décharge induite à travers un thermomètre de Breguet, ou un fil de platine traversant la boule d'un thermomètre à air, sont toujours affaiblis.

Si l'on remplace le barreau par un faisceau de *fils de fer*, toutes les actions sont augmentées, et tous les appareils indiquent une même direction du courant induit, excepté l'effet calorifique qui est diminué sensiblement.

Dans le cas des *courants voltaïques*, toutes les actions sont augmentées par les métaux magnétiques en masses ou en faisceaux, mais d'une manière différente, suivant la nature des effets que l'on observe. Par exemple, les solutions de continuité, qui accroissent d'une manière si marquée les actions physiologiques, sont sans influence sur la déviation du réomètre. Ainsi, les deux hélices de l'inducteur différentiel se faisant équilibre au réomètre quand l'une contient un barreau de fer, et l'autre un faisceau de fil de fer, il y a de violentes commotions. Si l'on retire une partie des fils de fer, de manière à faire disparaître toute commotion, l'aiguille du réomètre est vivement agitée dans le sens qui correspond à l'hélice qui contient le barreau massif. M. Dove ayant comparé les effets des barreaux égaux de fer, acier, fonte, en rétablissant l'équilibre au moyen de fils de fer placés dans l'hélice opposée, a trouvé, de même, que le nombre de ces fils est très différent, suivant qu'on apprécie le courant induit, par le réomètre ou par la commotion. Par exemple, avec l'acier trempé, la fonte grise et le fer forgé, il suffisait de 7, 11 et 15 fils de fer pour rétablir l'équilibre pour les actions physiologiques, tandis qu'il en fallait 28, 27, et plus de 110, pour les effets sur le réomètre.

IV. Induction réfléchie. — Extra courant. — Appareils d'induction volta-électriques.

1761. Induction d'un courant sur lui-même. — L'introduction et la suppression d'un courant dans un fil très long, peuvent donner naissance à des courants induits qui circulent dans le fil même qui reçoit le courant inducteur. La première observation se rattachant à ce phénomène a été faite, en 1832, par M. Henry : ayant fait passer le courant de quelques couples voltaïques, à travers un fil de 10 à 12 mètres de longueur, il obtint une vive étincelle au moment où il retirait une des extrémités du fil, d'une capsule de mercure servant à fermer le circuit. Si le fil était court, il n'y avait pas d'étin-

celle. S'il était enroulé en spirale ou en hélice à tours très rapprochés, l'étincelle était beaucoup plus brillante. Dal Negro obtint aussi une vive étincelle en interrompant le courant dans l'hélice d'un *électro-aimant*. M. Jenkins ayant pris dans ses mains les extrémités du fil d'un électro-aimant, fil dont il faisait communiquer deux points, éprouva une forte commotion, au moment où il supprimait la communication, et cela avec un seul couple. Masson a découvert, de son côté, le même phénomène ; il opère de la manière suivante : on prend dans les mains, des cylindres de laiton, de manière à fermer un circuit dans lequel se trouve une pile et un électro-aimant ; on met les cylindres en contact, pour que le courant passe directement de l'un à l'autre, puis on les sépare; aussitôt on ressent une forte commotion. Enfin, M. Pouillet, vers la même époque, observait un phénomène semblable avec le grand électro-aimant de la Faculté des sciences de Paris : ayant ouvert le circuit en prenant dans ses mains les extrémités de l'hélice magnétisante, qui plongeaient dans une capsule remplie de mercure, il reçut une violente secousse à laquelle il était loin de s'attendre. M. Faraday a prouvé que tous ces effets sont dus à un courant induit instantané, qui se développe dans le fil réophore, et qui s'élance sous forme d'étincelle entre les extrémités du fil au moment où on les sépare, ou dans les bras de l'expérimentateur qui les tient à la main. Ce phénomène est connu sous les noms d'*induction réfléchie*, d'*induction d'un courant sur lui-même*, et de *réaction des plis d'une hélice.*



Fig. 1307.

1762. Extra-courant.—M. Faraday a fait de nombreuses expériences sur l'induction réfléchie[1]. Pour mettre en évidence le courant induit instantané qui se produit dans le fil réophore, au moment où l'on ouvre le circuit contenant une hélice, il soude en deux points de ce circuit, deux fils, *f*, *f'* (*fig.* 1307), entre lesquels il place les appareils destinés à recevoir le courant induit. Le point de rupture *o* et l'hélice B doivent être dans des parties différentes du circuit séparé en deux par les points de soudure. Au moment où l'on ouvre ce circuit, parcouru par le courant d'un couple P, le courant produit par la rupture, se précipite dans les fils de dérivation. On peut ainsi obtenir en *ff'* la commotion, l'étincelle, les décompositions chimiques, l'aimantation et la déviation de l'aiguille aimantée. On peut faire rougir et fondre un fil très fin, que la portion du courant de la pile qui peut le traverser n'échauffe pas sensiblement. Tous ces effets sont singulièrement augmentés par la présence d'un barreau de fer doux dans l'hélice ; ils sont beaucoup plus faibles, au contraire, quand le fil de l'hélice est développé en ligne droite. Comme ils ne se manifestent qu'à l'instant où l'on rompt le circuit, on ne peut les attribuer au courant direct de la pile.

[1] *Bibliothèque universelle de Genève* (Sciences et arts), t. LIX, (1835), p. 128.

Le courant induit produit dans le circuit inducteur même, a été désigné par M. Faraday sous le nom *d'extrà-courant* [1]. Le même physicien a reconnu, au moyen des effets chimiques et magnétiques, que l'extrà-courant a, dans l'hélice, le même sens que le courant de la pile. L'extrà-courant marche donc dans le fil *f, f'* dans le sens même que suivrait le courant dérivé de la pile P qui le parcourrait, si l'on suppose que la pile se trouve, avec l'hélice B, dans la même partie du circuit, séparé en deux par les fils *f, f'*, comme dans la *fig.* 1307. Alors l'extrà-courant passe à travers la pile. Ce courant est, au contraire, de sens opposé, en *f, f'*, au courant dérivé qui traverserait ces fils, quand les points de soudure laissent la pile P dans la partie qui ne contient pas l'hélice B; alors, l'extrà-courant ne passe pas dans la pile. C'est ce qui a lieu dans le cas de la *fig.* 1308; l'interruption est en *sr*, le courant dérivé dans le fil de dérivation *rma* est dirigé suivant la flèche *a*, tandis que l'extrà-courant marche dans le sens de la flèche *e*, puisqu'il est la continuation de l'extrà-courant de l'hélice B.

Il se produit aussi un courant induit dans une hélice, au moment où l'on y introduit le courant de la pile; mais le circuit étant alors fermé, il faut certaines précautions pour dériver ce courant à l'extérieur, et pouvoir l'observer. M. Faraday a reconnu qu'il est, comme on devait s'y attendre, de sens contraire au courant de la pile. Masson, qui a répété les expériences de M. Faraday [2], procédait de la manière suivante : il disposait dans le conducteur de dérivation, une série de vases pleins d'eau, réunis par des arcs métalliques, pour augmenter la résistance au passage du courant de la pile. Au moment où ce courant était établi, le courant induit instantané, étant assez intense pour vaincre la résistance des vases, se portait en partie dans le conducteur dérivé, où l'aiguille aimantée était déviée de manière à indiquer un courant inverse; puis cette aiguille revenait au repos pendant le passage continu du courant inducteur. On peut aussi obtenir des étincelles et des commotions, au moment où l'on ferme le circuit qui contient l'hélice, et même décomposer l'eau, comme l'a fait M. Faraday; mais tous ces effets sont plus faibles que lorsqu'on ouvre le circuit, le courant induit inverse qui se produit au moment où l'on ferme le courant inducteur ayant pour effet de l'affaiblir au premier instant.

M. Edlund est parvenu à isoler l'extrà-courant par fermeture, et il l'a trouvé sensiblement égal à celui de rupture [3].

1763. Extrà-courant dans les courants instantanés. — M. Dove a prouvé que l'extrà-courant se développe dans une hélice, quand on la fait parcourir par la décharge d'une bouteille de Leyde. En effet, l'on éprouve une vive commotion quand on prend dans les mains, des cylindres fixés aux

[1] M. Dove l'appelle *contre-courant*, par opposition au nom de *juxtà-courant* qu'il donne au courant induit dans un fil voisin.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LXVI, p. 5.

[3] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LIII, p. 51.

fils f, f' (*fig.* 1307), la pile P étant remplacée par la bouteille de Leyde. Cette commotion n'est plus ressentie quand l'hélice n'est pas comprise entre les points de soudure, et elle est bien plus forte quand on introduit dans cette hélice un faisceau de fils de fer. Un *barreau* de fer ou de tout autre métal, diminue, au contraire, la commotion produite par l'extrà-courant, de même qu'il diminue l'intensité de la décharge induite dans un fil séparé (1758). M. Dove a aussi produit des extrà-courants au moyen des courants magnéto-électriques instantanés d'une machine de Saxton, lancés à travers une hélice, quoiqu'ils naissent et disparaissent presqu'au même instant, et il a trouvé que les masses métalliques exercent la même influence sur ces sortes de courants, que sur les courants induits dans un fil voisin.

1764. Lois de l'extrà-courant. — M. Abria a reconnu que l'extrà-courant est soumis aux mêmes lois que les courants induits dans des fils voisins [1]. Il comparait les intensités de ces courants, par la méthode de l'aimantation, et il a reconnu, avec des spirales de gros fils, en plaçant l'hélice magnétisante tantôt dans le courant de la pile, tantôt dans le fil de dérivation de l'extrà-courant, qu'il y a un rapport sensiblement constant entre les intensités de ces deux courants. L'extrà-courant était à peu près les 0,72 du courant principal, et la valeur de ce rapport ne variait pas beaucoup avec la longueur et la section de la spirale. Cette valeur est cependant un peu trop faible, à cause de la résistance qu'éprouve le courant principal dans l'hélice ; elle s'accorde avec celle qui a été obtenue dans l'induction sur un fil voisin.

Antérieurement, Masson avait étudié les effets produits par les masses de fer doux introduites dans les hélices où se forme l'extrà-courant. Il a reconnu que la présence du fer doux augmente beaucoup la commotion, mais de moins en moins à mesure qu'on multiplie le nombre des tours de l'hélice. En effet, la différence des actions obtenues avec le fer doux et avec l'hélice seule, va alors en diminuant ; ce qui est d'accord avec ce que nous savons de l'existence d'un maximum dans l'aimantation du fer (1670).

Quand on augmente la longueur du fil de l'hélice dans laquelle se développe l'extrà-courant, l'intensité des commotions augmente, et l'augmentation tend vers une limite qui dépend de la résistance que le fil oppose au courant principal. On doit donc penser que les commotions s'accroissent avec le nombre de couples de la pile. C'est, en effet, ce qui a lieu.

M. Faraday a reconnu, d'un autre côté, que les circonstances qui tendent à affaiblir le courant principal augmentent, au contraire, l'intensité de l'extrà-courant au moment de la rupture du circuit. Par exemple, si l'on met un fil de platine dans un courant, qui le rend incandescent, il n'y a qu'une étincelle très faible au moment de la rupture du circuit; mais si l'on ajoute à ce dernier un long fil de cuivre qui l'affaiblit assez pour que le fil de platine ne s'échauffe point, il y a une vive étincelle, à la rupture.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. VII, p. 474.

1765. De l'explication de l'extrà-courant. — Il y a deux cas à examiner : les réactions des plis d'une hélice les uns sur les autres, et l'induction d'un courant sur lui-même quand aucune des parties n'est repliée contre une autre.

1° Voici comment Masson présente l'explication donnée par M. Faraday, dans le cas d'une hélice à spires très rapprochées : au moment où l'on ouvre le circuit, la cessation du courant cesse de proche en proche, en passant par l'état variable. L'affaiblissement du courant dans la première spire développe donc un courant direct dans la spire suivante, lequel s'ajoute au courant de la pile. Ces deux courants réunis cessant ensuite dans la deuxième spire, déterminent dans la troisième un courant induit direct, qui s'ajoute aux deux courants réunis qui la parcourent. Ces trois courants réunis produisent de même un courant induit dans la quatrième spire, et ainsi de suite. On voit que ces courants engendrés les uns après les autres, vont en augmentant d'intensité ; et comme ils se succèdent avec une rapidité extrême, le phénomène paraît instantané. Les mêmes effets ont lieu en même temps à l'autre extrémité de l'hélice, et les courants induits qui y prennent naissance s'ajoutent à ceux dont nous venons de parler. Remarquons aussi que chaque spire agit sur plusieurs autres en même temps, entr'autres sur celles qui la précèdent et où les courants ont cessé ; celles-ci reçoivent donc aussi des courants directs qui s'ajoutent à ceux qui prennent naissance dans les spires suivantes. Il résulte de là qu'il faudra autant que possible, que chaque spire soit très rapprochée de toutes les autres ; il y aura donc avantage à les disposer en plusieurs couches superposées, de manière à former un anneau, plutôt qu'à les enrouler en une seule couche, formant une hélice dont les spires extrêmes seraient nécessairement trop éloignées les unes des autres pour s'influencer mutuellement. L'extrà-courant qui se produit au moment où l'on ferme le circuit, s'explique de la même manière, le courant se propageant de proche en proche dans les spires de l'hélice.

L'influence du fer doux s'explique facilement par l'induction que produit sur les spires de l'hélice, le magnétisme développé par l'extrà-courant même ; ce dernier, ainsi exalté, réagit de nouveau sur le barreau, l'aimante plus fortement et en reçoit un surcroît d'intensité, et ainsi de suite. Il se produit donc une série d'actions réfléchies, qui vont en diminuant d'énergie, et finissent par cesser, après s'être accomplies en un temps excessivement court.

2° L'induction sur lui-même d'un courant non plié en hélice, n'est pas aussi facile à expliquer. M. Faraday l'attribue à l'action exercée par le courant qui circule dans chaque série de molécules polarisées, sur les séries voisines, qui reçoivent l'induction de la même manière que si elles n'étaient pas elles-mêmes parcourues par des courants. Les choses se passeraient donc comme dans un faisceau de fils parallèles, dans lesquels se subdiviserait un même courant ; chaque fil réagissant sur les autres, y produirait l'extrà-courant. Cependant des essais tentés pour appuyer cette assimilation, n'ont pas donné des résultats aussi concluants qu'on pouvait l'espérer.

1766. EFFETS DE L'EXTRA-COURANT. — L'extrà-courant, produit par la rup-

ture d'un circuit contenant un électro-aimant, possède, en général, les mêmes propriétés que les courants d'induction ordinaires. Il joue un rôle important dans les appareils magnéto-électriques, où il concourt à l'accroissement qu'éprouve l'intensité de la commotion, quand on interceptele passage des courants induits successifs pendant une partie de leur courte durée (1728). Il fait aussi sentir son influence sur la formation des courants induits des divers ordres, et contribue à en déguiser les lois. MM. Masson et Breguet ont pu charger un condensateur avec l'extrà-courant, et obtenir ainsi de l'électricité statique. Il faut, pour cela, employer les mêmes précautions que lorsqu'on veut charger le condensateur avec les machines magnéto-électriques (1728).

Effets physiologiques. — Les effets physiologiques de l'extrà-courant diffèrent cependant de ceux des courants induits produits par les courants voltaïques instantanés ; c'est que ces derniers sont composés de deux courants successifs de sens contraire, tandis que l'extrà-courant se compose d'un mouvement d'électricité dans un seul sens. Cette distinction est importante pour les applications à la médecine.

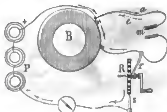


Fig. 1308.

Masson a fait une étude spéciale des effets physiologiques de l'extrà-courant [1]. Il a reconnu qu'il n'affecte que les points touchés, et que la sensation ne s'étend que fort peu au-delà de ces points ; ainsi, en appuyant seulement un doigt sur chacun des cylindres à commotions, il ne ressentait, avec son appareil, qu'un léger frémissement ne s'étendant pas au-delà de la première phalange ; en saisissant ces cylindres avec 2, 3... doigts, puis avec la main, la secousse augmentait rapidement d'intensité ; d'où il conclut que chaque filet nerveux communique l'ébranlement qu'il reçoit au nerf principal, et que la sensation est l'effet résultant de tous ces petis ébranlements, qui s'ajoutent. Cette localisation de l'action physiologique a une grande importance dans les applications médicales.

Pour produire une succession rapide de commotions par l'extrà-courant, Masson a employé la disposition suivante (*fig.* 1308). B est l'hélice, P, la pile, *m* les manipules disposés dans les fils de dérivation *am*, *mr*. Dans le circuit principal se trouve une roue dentée métallique R, mise en relation avec le circuit par les ressorts *r* et *s*, dont le premier s'appuie constamment sur l'arbre de la roue, et l'autre sur son contour ; le circuit est fermé quand le ressort *s* s'appuie sur une dent métallique, et ouvert quand il correspond à l'intervalle de deux dents. Avec cet appareil, Masson a pu tuer en quelques minutes un chat vigoureux placé en *m*, et cela avec une pile de 5 ou 6 couples seulement. Il est à remarquer que les commotions diminuent d'intensité quand on

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LXVI, p. 26.

tourne trop vite ; ce qui provient sans doute de ce que les extrà-courants successifs sont alors tellement rapprochés, que leur effet diffère peu de celui d'un courant continu, qui ne peut produire de commotions (1513).

1787. Condensateur voltaïque. — M. de La Rive s'est servi de l'extrà-courant pour donner à un seul couple la faculté de décomposer l'eau rapidement[1]. L'artifice qu'il emploie consiste à lancer l'extrà-courant dans la pile que contient le circuit, et dans un sens convenable pour augmenter l'oxydation du zinc et pour désoxyder le sulfate de cuivre ou l'acide nitrique. La *fig.* 1309 représente le *condensateur voltaïque* ou *condensateur électro-chimique*, imaginé pour cet objet. *ff'* est un électro-aimant dont le fil aboutit aux capsules à mercure o, o'. Le circuit qui contient l'hélice magnétisante et la pile P, est fermé par l'intermédiaire d'un ressort *nm*, recourbé en crochet à son extrémité *m*, qui plonge dans une capsule métallique amalgamée. Cette capsule communique directement avec la coupe à mercure *c*, dans laquelle s'enfonce l'un des pôles de la pile. Une petite balle de fer soudée au ressort *nm*, est attirée par le fer doux *f'*, quand l'électro-aimant est en activité ; alors ce ressort se relevant, le circuit est ouvert en *m*, l'extrà-courant se produit et s'élance dans le circuit de dérivation *o'vc'* contenant un volamétre *v*, et dans le couple P, où il a le même sens que le courant principal, et où l'oxydation du zinc est activée. Le fer de l'électro-aimant étant ramené à l'état neutre par la rupture du courant, le ressort *nm* retombe ; le courant se rétablit donc, le ressort se relève de nouveau, et ainsi de suite, de manière à faire 6 à 8 oscillations par seconde, et l'eau est décomposée rapidement dans le voltamètre. Il faut que le fil qui entoure le fer doux soit gros et d'une longueur modérée. M. de La Rive le forme de 3 fils de cuivre réunis aux extrémités, de manière à n'en former qu'un de section triple, et lui fait faire 100 tours. Un couple de Daniell, incapable de décomposer l'eau, la décompose avec l'aide du multiplicateur, et dégage de 18 à 20 centimètres cubes de gaz par minute. — Si la pile n'est pas traversée par l'extrà-courant, comme dans la *fig.* 1308, la décomposition de l'eau est très faible.

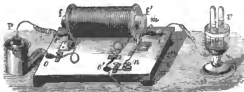


Fig. 1309.

On voit qu'avec le condensateur voltaïque on obtient d'un seul couple, des effets chimiques qui en exigeraient plusieurs dans chacun desquels il y aurait la même quantité de zinc dissoute. Il ne faudrait pas croire cependant que la quantité de zinc dissoute dans le couple unique aidé du condensateur, ne dépasse pas la quantité qui correspond au nombre d'équivalents d'eau décomposée. M. de La Rive fait remarquer, en effet, que pendant la fermeture du

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. VIII, p. 36.

circuit par le ressort *mn*, le courant passe presque entièrement par ce ressort et ne traverse pas le voltamètre; le zinc dissous pendant ce temps-là n'est donc pas représenté par de l'eau décomposée. Du reste, des expériences directes de M. Despretz ont montré que la quantité de zinc dépensée peut être près du double de celle qui correspond au volume de gaz recueilli dans le voltamètre [1]. Cet habile physicien employait 8 couples à charbon à zinc amalgamé, disposés de manière à représenter deux couples de surface quadruple. Le zinc, pesé avant l'expérience, l'était de nouveau après qu'il s'était dégagé $\frac{1}{2}$ litre de gaz. On doit donc se demander s'il y a plus d'avantage à augmenter la force électromotrice au moyen du multiplicateur voltaïque, qu'à l'augmenter au moyen de couples additionnels capables de donner une décomposition tout aussi active. M. de La Rive pense que la consommation de zinc est la même dans les deux cas [2]. Seulement, l'emploi du condensateur est avantageux, parce qu'il occupe peu de place, et qu'il n'exige pas les soins qu'il faut donner aux couples dont il remplace l'effet. Cependant, il est probable qu'il doit y avoir une perte sensible de zinc, à cause du passage du courant par le ressort *mn*, pendant qu'il ferme le circuit de la pile.

1768. Appareils d'induction électro-voltaïques. — Nous avons décrit ci-dessus (1727) les machines d'induction *magnéto-électriques*. Il nous reste à faire connaître les appareils d'induction par les courants voltaïques, appareils dont nous n'avons pas parlé plus tôt, à cause du rôle que joue l'extrà-courant dans la plupart d'entre eux. Ces appareils sont souvent construits en vue des applications médicales. Les courants induits conviennent, en effet, tout particulièrement à l'électrisation musculaire ; ils sont produits par des appareils très portatifs, et faciles à gouverner. Ces sortes de courants offrent encore l'avantage, à cause du peu d'intensité de leurs effets chimiques et calorifiques, de ne pas désorganiser les tissus, comme peuvent le faire les décharges leyd-électriques, ou celles des piles à grand nombre d'éléments ; de plus, dans les applications aux muscles de la face, on remarque que ces courants n'affectent que très faiblement l'organe de la vue, tandis que les courants directs d'une pile agissent vivement sur la rétine et peuvent occasionner des accidents graves. Aussi, M. le Dr Duchenne, auquel on doit de nombreuses recherches sur l'emploi de l'électricité en thérapeutique [3], remarque-t-il que les courants induits constituent l'électricité vraiment médicale, et il nomme *faradisation*, du nom de M. Faraday, l'application de ces sortes de courants, à l'art de guérir.

Les appareils d'induction électro-voltaïques ont reçu des constructeurs, bien des formes différentes ; on s'est appliqué surtout à diminuer leur volume, ainsi que celui du couple qui les fait fonctionner, et à les disposer de manière à

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XLIV, p. 1009.

[2] *Bibliothèque universelle de Genève* (Arch. des sc.), t. XXV, p. 115.

[3] *De l'électrisation localisée et de son application à la physiologie*, etc.. 1 vol., 1855.

ce qu'on puisse faire varier avec facilité la rapidité des interruptions, et l'intensité des courants induits qu'elles provoquent.

Divers réotomes. — Une pièce importante de tous ces appareils est le *réotome*, destiné à interrompre et rétablir successivement le passage du courant inducteur. Un réotome fort employé est la roue dentée de Masson (1766). Un autre système, employé dès 1804 par Aldini, dans ses expériences de physiologie faites avec la pile, consiste en une plaque métallique striée, communiquant avec une des extrémités du circuit inducteur, et sur laquelle on fait glisser plus ou moins rapidement l'autre bout du fil, de manière que le courant se trouve interrompu, pendant le passage du fil, d'une partie saillante à la suivante. M. de La Rive a employé aussi un arbre tournant portant des aiguilles métalliques, qui plongent à chaque tour dans des capsules de mercure isolées, de manière à fermer le circuit, dont les extrémités aboutissent à ces capsules. Un mécanisme d'horlogerie fait tourner l'arbre avec une vitesse que l'on modifie à volonté. Ce système donne les plus fortes commotions, mais le mercure est projeté, il s'oxyde bientôt, et la communication n'est plus aussi complète.

On se sert le plus souvent de réotomes automatiques agissant d'eux-mêmes sous l'influence même du courant de la pile. L'appareil tournant de Ritchie (1669) a été employé pour cet usage par M. Breton, par M. Bianchi.... Le courant qui passe par cet appareil est interrompu toutes les fois que les extrémités du fil de l'électro-aimant tournant, passent par dessus la cloison qui traverse le mercure.



Fig. 1310.

Un des réotomes les plus employés est le *trembleur*, imaginé en même temps par M. Neef et par M. de La Rive. Ce système n'est autre que celui dont nous avons vu le jeu dans le condensateur voltaïque, et qui a été utilisé, depuis, par M. Froment dans son appareil électro-musical (1669).

1769. Appareils à commotions. — Ces appareils, assez nombreux, diffèrent principalement par la manière dont se fait la rupture du courant inducteur, et par les dispositions qui permettent de modifier l'intensité des courants induits. La *fig.* 1310, représente le petit appareil de M. Mirand, modifié par M. Bianchi, et qui donne des commotions énergiques avec un simple couple à charbon de 10 centimètres de hauteur. Sur une bobine de bois E, sont enroulés deux fils recouverts de soie. Le premier, assez gros, constitue le fil inducteur; l'autre, beaucoup plus fin et formant un très grand nombre de tours, appartient au circuit induit; il aboutit à deux boutons à vis *o'*, *o'*, auxquels on fixe les réophores qui doivent transmettre les courants induits. Les extrémités du fil inducteur sont fixées aux boutons *o*, *o*, auxquels aboutissent les électrodes P du couple voltaïque. Le courant, après avoir parcouru la bobine E, arrive au support métallique *a*, parcourt les ressorts *r*, *s* quand ils se touchent, passe dans

le support *c*, et retourne à la pile aprés avoir circulé dans l'héliee magnétisante d'un petit électro-aimant *c*. Cet électro-aimant attire le ressort en fer *r*, ce qui rompt le circuit en *sr*; alors le ressort *r* revient en arriére, le eircuit est de nouveau fermé, et l'électro-aimant attire le ressort de manière à rompre de nouveau le circuit, et ainsi de suite. Pour modifier la rapidité des oscillations du *trembleur sr*, on écarte plus ou moins de l'électro-aimant, les ressorts *r* et *s*, en faisant tourner sur eux-mêmes les supports *c* et *a*. On fait varier l'intensité des eourants induits, en enfonçant plus ou moins dans la bobine E, des fils de fer *f* en nombre variable. Les commotions, assez faibles en l'absence du fer, deviennent insupportables quand le faisceau est introduit. C'est afin de pouvoir déplacer à volonté les fils de fer, qu'on fait fonctionner le trembleur au moyen d'un électro-aimant séparé. L'appareil peut être enveloppé d'une boîte dont le dessus s'ouvre à charnière, et dont le fond est formé par la table même de l'instrument. Cette boîte laisse en dehors les boutons *o*, *o* ; *o'*, *o'*, et porte une ouverture par laquelle on introduit les fils de fer. Enfin, une petite caisse séparée contient le couple et deux flacons dans lesquels on verse les acides, quand on cesse de s'en servir.

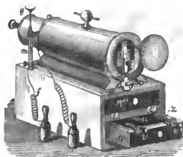


Fig 1311.

Appareil volta-faradique de M. Duchenne. — Dans cet appareil (*fig.* 1311), le couple est renfermé dans un tiroir T, où il peut rester amorcé pendant plusieurs mois. Ce couple est composé d'une eaisse en zinc *z*, qui s'ajuste dans le tiroir, et renferme une masse rectangulaire en charbon de cornue, qui la remplit exactement. On verse dans la caisse un peu d'eau salée, et l'on imbibe le charbon d'acide azotique, que l'on verse dans une rigole *u*, creusée à sa partie supérieure. Ce systéme constitue un couple à charbon sans diaphragme. Deux boutons à vis *v*, *v'* communiquent avee le zine et avee le charbon ; et quand le tiroir T se trouve enfoncé de la même manière qu'un second tiroir T', ces boutons touchent des lames de platine *e*, *e'*, auxquelles sont soudées les extrémités du fil inducteur. Le courant du couple passe d'abord par un réométre fixé dans le tiroir T', et de là dans un ressort qui s'appuie sur la roue dentée à manivelle *r*, servant de réotome. De l'arbre de eette roue, le courant est eonduit dans un *trembleur* disposé eomme celui de la syrène électro-magnétique (1669), et dont on règle les vibrations au moyen de la vis *c*. Si l'on veut employer le trembleur, on place la roue *r* de manière que le ressort s'appuie sur une partie métallique. Si l'on veut se servir de la roue dentée, on serre la vis c de manière à établir une eommunication permanente entre les ressorts du trembleur. Le eourant passe

ensuite dans une hélice contenant un faisceau de fils de fer, et arrive enfin à la lame de platine *e'*, et au bouton *v'*. Autour de l'hélice est enroulé un long fil très fin, qui constitue le fil induit, dont les extrémités aboutissent à deux boutons, auxquels on fixe les réophores destinés à recueillir les courants induits.

Pour faire varier l'intensité de ces courants, M. Duchenne emploie deux systèmes différents. Le premier, appliqué par M. Bonijol, dés 1840, à ses cassettes d'induction, est désigné sous le nom de *moderateur*. Il consiste en un tube de verre *m* rempli d'eau, dont le fond métallique communique avec le réophore *f*, et dans lequel on peut enfoncer plus ou moins une tige *o* mise en rapport, par la virole supérieure du tube, avec l'extrémité du fil induit. Les courants induits sont d'autant plus affaiblis que la tige *o* est moins enfoncée. On peut ensuite graduer ces courants avec précision, au moyen de la méthode de M. Dove (1730) : deux manchons concentriques en cuivre enveloppent, l'un l'hélice induite, et l'autre, le faisceau de fer doux ; on les retire plus ou moins, soit ensemble, soit séparément, quand on veut renforcer les courants induits. Cette partie de l'appareil se nomme le *graduateur*. — Au bout de 2 ou 3 mois, le couple cesse de fournir un courant suffisamment intense ; il faut alors le démonter, plonger le charbon dans l'eau, pour dissoudre les sels qui s'y sont formés, et renouveler l'eau salée et l'acide nitrique. Malgré toutes les précautions, il est bien difficile d'éviter que les vapeurs acides n'attaquent à la longue quelques-unes des parties métalliques de l'appareil; aussi préfére-t-on généralement se servir d'un couple séparé. M. Breton a imaginé, pour les usages médicaux, une pile qui reste toujours humide : le zinc et le cuivre sont remplacés par des limailles de ces métaux mêlées à de la sciure de bois, séparées par un vase poreux, et mouillées par une dissolution de chlorure de calcium, qui absorbe constamment l'humidité de l'air. On a construit des appareils puissants pouvant être renfermés, avec le couple destiné à les faire fonctionner, dans une caisse n'ayant pas plus de 1 décimétre cube de volume. Quoi qu'il en soit, l'embarras de monter et démonter le couple, et les soins et les frais qu'exige son entretien, ont fait préférer généralement les appareils *magnéto-électriques*, qui sont toujours prêts à fonctionner, et n'exigent aucuns soins particuliers pour être maintenus en bon état.

Les commotions produites par les courants induits dépendent de la rapidité avec laquelle se succèdent les courants intermittents, et de la durée de chacun d'eux. M. Guillemin a fait de nombreuses expériences à ce sujet[1]. Il a reconnu, entr'autres, que : 1° la commotion diminue à mesure que les intermittences sont plus fréquentes ; quand elles sont trés nombreuses (plus de 100 par seconde), on ne perçoit plus qu'un frémissement, qui finit par devenir nul, quand elles sont encore plus nombreuses. 2° La commotion est d'autant plus grande, que le temps qui sépare les deux courants induits successifs est plus

[1] *Recherches expérimentales sur l'induction volta-électrique*. Montpellier. 1861.

grand. 3° Une armature de fer, introduite dans la bobine, n'augmente la commotion que lorsque les intermittences ne sont pas très rapprochées.

1770. Machine de Ruhmkorff. — Cet appareil, désigné souvent sous le nom de *bobine de Ruhmkorff*, produit, avec les courants induits, des effets de tension semblables à ceux que donne l'électricité statique. Dès 1842, MM. Masson et Breguet, dans leurs recherches sur l'extra-courant, avaient fait construire un appareil d'induction qui, malgré que les fils ne fussent pas convenablement isolés, donnait de vives étincelles, et de la lumière électrique dans le vide assez intense pour faire reconnaître des différences remarquables dans l'éclat lumineux des deux électrodes [1]. M. Bonijol obtenait aussi avec les courants induits ordinaires, l'incandescence de fils de platine, et un



Fig. 1312.

petit arc voltaïque entre deux charbons. M. Ruhmkorff, réunissant toutes les conditions les plus favorables, a construit, en 1851, un appareil qui donne des effets de tension extraordinaires, des commotions foudroyantes, et des étincelles de plusieurs centimètres de longueur. Il s'est appliqué surtout à bien isoler les fils de l'hélice, et a donné à celle-ci une grande longueur, parce que c'est plutôt du nombre de spires que de leur grandeur que dépend l'intensité des courants induits. Après avoir d'abord placé l'hélice verticalement, il l'a disposée ensuite horizontalement, afin de pouvoir plus facilement lui donner une grande longueur.

L'appareil de M. Ruhmkorff se compose d'un faisceau de fils de fer doux réunis à leurs extrémités par des disques en fer doux *m* (*fig.* 1312), enveloppé d'un cylindre de carton sur lequel sont enroulés deux fils de cuivre recouverts de soie, et dont les tours sont isolés avec beaucoup de soin au moyen de gomme laque. Le premier fil a 2 millimètres de diamètre; c'est lui qui doit recevoir le courant inducteur de la pile. Le second fil, qui n'a que $\frac{1}{4}$mm de diamètre, est enroulé sur le premier; il forme le circuit induit. Il fait 25 à 30 mille tours, et a jusqu'à 10 kilomètres de longueur. Les extrémités de ce fil sortent

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. IV, p. 129.

en *i* et *i'*, et sont fixées à des viroles isolées par des colonnes de verre, et auxquelles on adapte les réophores *e*, *e'*, destinés à recueillir les courants induits. Deux disques en verre *v*, *v'* retiennent les fils de la bobine. Les extrémités du fil inducteur sortent de cette bobine, l'un en *f*, l'autre en *f'*, et sont mis en communication avec les électrodes *p* et *n* de la pile, par l'intermédiaire des ressorts du commutateur R, dont le support de gauche communique avec le fil *f* par une bande de cuivre appliquée sur la table de l'appareil, et celui de droite, avec le fil *f'*, par une bande semblable qui passe derrière la bobine, et vient aboutir en *c*, et par les pièces *c'c*, *or*, qui constituent un interrupteur dans le système de MM. Neef et de La Rive. La lame de cuivre *c'c* porte un cylindre *c*, nommé l'*enclume*, dont la base supérieure est garnie d'un disque de platine. Sur ce cylindre s'appuie un appendice, aussi en platine, fixé au-dessous de la tête en fer doux *o* d'un marteau *or*, mobile, à charnière, sur la colonne métallique *r* à laquelle aboutit l'extrémité *f'* du fil inducteur. Quand le marteau est abaissé, le circuit inducteur est *fermé* ; alors, le marteau est attiré par le fer doux *m*, et le circuit *est rompu* entre *o* et *c* ; le marteau retombe alors, le courant inducteur est rétabli, et ainsi de suite. Une vis placée entre *c* et *c'*, et qui s'appuie sur la table de l'appareil, permet de soulever plus ou moins l'*enclume* *c* et de modifier ainsi la rapidité des interruptions. Les bornes *a*, *a'* servent à fixer des réophores, quand on veut recueillir l'extrà-courant qui se produit dans le fil inducteur pendant les interruptions.

1771. Perfectionnements apportés à l'appareil de Ruhmkorff. — Plusieurs physiciens ont cherché à perfectionner la bobine de Ruhmkorff, de manière à en augmenter la puissance.

Condensateur annexé au circuit inducteur. — M. Fizeau ayant découvert qu'on augmente beaucoup l'intensité des courants induits en faisant communiquer avec les armatures d'un condensateur, deux points du circuit inducteur, pris de part et d'autre du réotome, M. Ruhmkorff a fait communiquer les boutons *a*, *a'*, qui appartiennent à ce circuit, avec les armatures d'un condensateur. Ce condensateur est formé d'une bande de taffetas gommé de 4^m de longueur, sur les deux faces de laquelle sont collées des feuilles d'étain, et qui est repliée entre deux autres bandes de taffetas, de manière à pouvoir être logée dans l'épaisseur de la table de l'appareil.

M. Halske forme le condensateur d'une feuille de mica très mince garnie de feuilles d'étain, et présentant 2 décimètres carrés de superficie. Ce condensateur, sous de moindres dimensions, agit bien plus efficacement que le condensateur en taffetas, dont la lame isolante présente une épaisseur plus grande et moins uniforme que le mica. Cette dernière substance peut être remplacée par du papier fin verni à la gomme laque.

On n'est pas d'accord sur le rôle que joue le condensateur. M. Fizeau pense qu'il recueille et condense l'électricité de l'extrà-courant, qui produit un courant induit inverse, de sens contraire au courant direct résultant de

la rupture du circuit inducteur, puisque l'extrà-courant est de même sens que le courant principal. En effet, la présence du condensateur rend beaucoup plus faible l'étincelle qui jaillit entre le marteau et l'enclume, tout en augmentant celle que fournit le courant induit [1]. Des expériences de M. Poggendorff et de M. Gaugain prouvent aussi qu'on augmente les effets du courant induit, quand on diminue l'intensité de l'extrà-courant en apportant une résistance au point de rupture, ce qui se fait en plongeant le réotome dans un liquide peu conducteur, comme l'eau, l'alcool.

M. Poggendorff a reconnu, en employant des condensateurs de dimensions diverses, depuis 7 jusqu'à 400 centimètres carrés, que les plus petits agissent à peu près de la même manière que les grands, quand on se sert d'une pile peu énergique ; les étincelles sont tout aussi longues, seulement un peu moins grosses. Mais lorsqu'on emploie un grand nombre de couples, c'est-à-dire qu'on se place dans les conditions qui donnent un extrà-courant énergique, les grands condensateurs sont beaucoup plus efficaces que les petits, qui deviennent presque inutiles ; ce qui confirme l'explication de M. Fizeau (1771).

Il est à remarquer que le condensateur n'est efficace que dans le cas où le courant induit trouve lui-même des résistances à vaincre, des obstacles à franchir ; quand il n'en est pas ainsi, la présence du condensateur n'a plus qu'une très faible influence.

Bobines cloisonnées. — M. Poggendorff, après s'être livré à une étude particulière du rôle des différentes parties de l'appareil de Ruhmkorff, y a apporté diverses modifications importantes [2]. L'expérience prouve que les deux extrémités du fil induit n'ont pas la même tension ; car on peut tirer des étincelles de l'extrémité *extérieure*, tandis que l'on ne peut en obtenir de l'extrémité *intérieure*, c'est-à-dire de celle qui termine la couche la plus profonde de la bobine induite. M. Poggendorff, afin d'éloigner autant que possible les parties du fil qui, n'ayant pas la même tension, tendraient à laisser passer une décharge qui percerait l'enduit isolant, fait sortir les deux bouts de ce fil par les extrémités opposées de l'appareil. Depuis, il a divisé l'hélice induite en tronçons placés bout à bout sur la même bobine, comme on le voit en B (*fig.* 1315), ce qui offre, en outre, cet avantage que, si l'enduit isolant est percé par une décharge intérieure, on ne perd que la longueur des deux couches du tronçon qui communiquent, et l'on n'a à remplacer que ce tronçon. Au lieu d'isoler le fil avec de la gomme laque dissoute dans l'alcool, le même physicien applique à l'état de fusion, un mélange de blanc de baleine, d'acide stéarique, d'huile et de cire.

M. Poggendorff introduit dans la bobine, des fils de fer très fins n'ayant que $\frac{1}{4}$mm de diamètre, dont le faisceau en contient 1200. On peut, du reste, en retirer un grand nombre sans affaiblir sensiblement leur effet, et il est inutile de

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XXXVI, p. 418.

[2] *Pogg. Ann.*, t. XCIV, 289 ; et *Annales de ch. et de ph.*, 3e série, t. XLIV, p. 375.

les vernir, la couche d'oxyde qui ne tarde pas à les recouvrir, les isolant suffisamment.

L'interrupteur ou réotome a été placé à part et mis en mouvement par un petit électro-aimant séparé, ce qui a permis de le faire jouer dans différents fluides, et même dans le vide. C'est ainsi que M. Poggendorff a pu constater que le condensateur annexé au circuit inducteur n'a plus d'influence, quand l'interrupteur est plongé dans un liquide imparfaitement conducteur. Mais ce qu'il y a de remarquable c'est que les résultats sont encore les mêmes avec et sans condensateur, quand le réotome est dans l'air réduit à une pression de 3 à 4^{mm}. Dans ce cas, les étincelles qui jaillissent entre le marteau et l'enclume sont aussi très fortes, et altèrent rapidement ces deux pièces.

Interrupteur à mercure. — Dans les grands appareils, les lames de platine qui garnissent le marteau et l'enclume s'altèrent; et peuvent même se souder. M. L. Foucault évite cet inconvénient, au moyen de son interrupteur à mercure (*fig.* 1313). Le courant inducteur venant de la pile P passe par le fond métallique d'un vase de verre *v* contenant du mercure et de l'alcool. Une tige de platine[1] *t* ferme le circuit quand elle touche le mercure; cette tige est portée par un levier *tc* fixé à une lame élastique *rm* pouvant osciller autour de son extrémité inférieure, et dont on limite à volonté la partie libre, au moyen d'une crémaillère et du pignon denté *s*; la masse *m* sert à régler la durée des oscillations. A chaque demi-oscillation, la tige *t* s'enfonce dans le mercure; alors le courant passe dans le levier *td* et le ressort *dr* qui communique en I avec le fil inducteur de la bobine, puis revient par I'*i* au commutateur R et à la pile P. — Il reste à montrer comment on fait osciller le ressort *rm*, et par conséquent le levier *tc*. En *c* est un contact en fer dépendant d'un électro-aimant EE parcouru par le courant d'un couple spécial C. Ce courant passe par le commutateur R', arrive au vase *v'* contenant du mercure et de l'alcool, et dans lequel s'engage une tige de platine *t'*. Quand cette tige touche le mercure, le circuit de l'électro-aimant EE est fermé, et le courant retourne à la pile par *t'dro* et le commutateur R'. En même temps, le contact *c* est attiré, et la tige *t'* sortant du mercure, le circuit s'ouvre en *t'v'*.

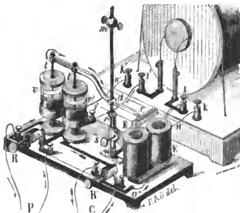


Fig. 1313.

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XLIII, p. 11.

Alors le contact devient libre, le ressort *vm* revient sur lui-même et la tige *t'* s'eufonce dans le mercure ; aussitôt l'électro-aimant attire le contact *c*, le circuit est interrompu en *t'v'*, et ainsi de suite. Les fils *n* et *n'* communiquent avec les bornes *k*, *k'* qui appartiennent aux armatures du condensateur logé dans le socle de la bobine. — L'interrupteur fait ordinairement 50 à 60 oscillations par seconde. Pour obtenir un nombre double d'interruptions avec le même nombre d'oscillations, M. L. Foucault emploie un interrupteur à *double effet* : à l'extrémité *c* se trouve une tige de platine plongeant dans un vase à mercure et alcool, de manière que le circuit inducteur est fermé par ce vase à la fin de la demi-oscillation qui l'ouvre dans le vase *v*.

L'alcool superposé au mercure est destiné à en empêcher l'oxydation ; sa présence rend aussi l'interruption plus brusque, comme on le reconnaît au bruit sec qui accompagne l'étincelle qui se produit dans ce liquide. Avec les forts appareils l'alcool peut être projeté au-dehors; c'est pourquoi les vases *v*, *v'* doivent être munis d'un couvercle.

1772. Effets de l'appareil de Ruhmkorff [1]. — Quand le circuit induit de l'appareil de Ruhmkorff est fermé par un bon conducteur, il se produit des courants induits alternativement de sens contraire; directs au moment de la rupture du circuit, quand le marteau est attiré, et inverses quand le marteau retombe sur l'enclume. On reconnaît, par les moyens décrits ci-dessus (1736) que ces deux sortes de courants sont égaux en quantité, mais les courants directs ont une moindre durée, et par conséquent, une plus forte tension. Quand le circuit induit est interrompu, les courants directs peuvent seuls passer, et les extrémités du fil présentent des pôles bien caractérisés. M. Poggendorff s'en est assuré, soit en faisant jaillir de l'une de ces extrémités, une étincelle sur le bouton d'un électroscope, soit en rapprochant les extrémités de manière à laisser passer le courant sous forme d'étincelle, et plaçant dans le circuit un réomètre ou un voltamètre.

Commotion. — Avec un ou deux couples à charbon, l'appareil de Ruhmkorff donne des commotions foudroyantes auxquelles il serait plus que téméraire de s'exposer. En touchant seulement du doigt le fil induit quand le circuit est fermé, on reçoit une violente secousse, même quand ce fil est recouvert de soie au point touché. Il faut donc employer les plus grandes précautions, et ne jamais oublier de rompre le courant inducteur, au moyen du commutateur R (*fig.* 1312), pendant qu'on prépare les expériences.

Etincelle. — L'énorme tension des courants induits de la machine de Ruhmkorff se manifeste surtout dans les effets lumineux qu'ils produisent. Si l'on ajoute aux extrémités du fil induit, de gros fils de cuivre dont les extrémités soieut fixées à une petite distance l'une de l'autre, on obtient un jet presque continu d'étincelles d'un blanc éclatant, formant un faisceau de trois ou quatre traits de feu sinueux, dans une agitation continuelle. Les étincelles sont

[1] *Notice sur l'appareil d'induction de Ruhmkorff*, par M. Th. du Moncel.

d'autant plus longues, que les interruptions du courant inducteur sont moins rapides. Les bobines cloisonnées, munies de l'interrupteur Foucault conduit avec la main, peuvent en donner 35 centimètres et plus. Si, au contraire, l'interrupteur oscillant étant remplacé par une roue dentée, on fait tourner celle-ci avec une rapidité croissante, les étincelles sont de plus en plus courtes et finissent même par disparaître ; ce qui provient de ce que le magnétisme du fer ne se développe pas instantanément (1729). — On peut interposer un tube étincelant (1286) dans le circuit induit, et en obtenir les effets les plus brillants.

Masson a remarqué que si l'on fait jaillir les étincelles entre deux fils de fer très fins, le fil négatif seul rougit et brûle. Ce n'est qu'avec un courant inducteur énergique que l'on voit les deux fils rougir en même temps.

Si l'on fait communiquer les extrémités du *fil induit* avec les armatures d'un condensateur, armatures réunies en même temps par un excitateur, on obtient entre les branches de ce dernier des étincelles plus fortes, plus brillantes, mais

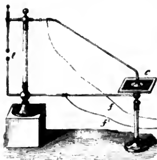


Fig. 1314.

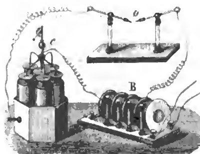


Fig. 1315

généralement moins longues. Masson, qui a découvert ce résultat, en 1842, a repris plus tard ses expériences au moyen de l'appareil de Ruhmkorff. La *fig.* 1314 montre la disposition qu'il employait. *c* est le condensateur, *f*, *f'* les extrémités du fil induit, et *e* l'excitateur entre les branches duquel partent les étincelles. Masson a constaté aussi que l'étincelle n'est exaltée par le condensateur qu'autant que l'excitateur *e* présente une résistance moindre que celle du fil induit. MM. Grove et Gassiot ont reconnu, d'autre part, que l'énergie de l'étincelle augmente avec l'étendue du condensateur et le nombre des couples de la pile ; mais il faut pour cela que cette étendue et ce nombre de couples soient augmentés en même temps et dans le même rapport. Avec un courant inducteur, produit par 30 couples à charbon, et un condensateur de ½ mètre carré, ils obtinrent en *e* un torrent de feux volumineux, produisant un bruit assourdissant, et présentant une longueur de 4^{mm}, qui devenait 10 fois plus grande quand ils diminuaient la résistance de l'air en *e*, au moyen d'une flamme d'esprit de vin.

Quand on veut charger un condensateur non isolé *c* (*fig.* 1315), on fait communiquer l'armature intérieure avec l'extrémité extérieure du fil induit, qui présente la plus forte tension, et l'on a soin qu'il y ait une interruption *o* que franchit seul le courant de rupture, parce qu'il a plus de tension que celui de fermeture. En quelques secondes, on charge ainsi un grand condensateur.

S'il n'y avait pas d'interruption, le condensateur se déchargerait par le fil induit ; cependant, dans ce cas, M. Koosen a observé des vibrations dans les armatures, quand elles ne sont pas adhérentes à la lame de verre ; ce qui montre que le condensateur se charge et se décharge alternativement.

Batterie d'induction. — Pour obtenir des résultats intenses sans courir le risque de percer l'enduit isolant en employant un grand nombre de couples, M. L. Foucault a eu l'idée de réunir en batterie plusieurs appareils égaux, de manière qu'ils marchent bien d'accord. Pour atteindre ce but, un même courant se subdivise dans les fils inducteurs des différentes bobines, et les extrémités par lesquelles il sort se réunissent à un seul fil qui passe par un interrupteur à mercure. Les fils induits sont mis en rapport les uns avec les autres, de manière que l'extrémité extérieure du fil d'une bobine communiquant avec l'extrémité intérieure du fil de la suivante, les courants induits au même instant dans tous les appareils s'ajoutent. L'expérience montre que : 1° la différence des tensions aux extrémités du fil induit de chaque bobine est la même que si cette bobine était seule et était parcourue par le courant *partiel* qu'elle reçoit ; 2° la différence des tensions aux extrémités du fil induit total des appareils réunis, est égale à la somme des différences observées dans chaque bobine en particulier. Si donc il y a 4 bobines, on pourra, avec une pile de 4 fois plus de couples, obtenir une tension 4 fois plus forte, sans craindre de percer les enduits isolants, chaque bobine ne recevant pour courant inducteur que le quart du courant de la pile. — Avec deux appareils très puissants, réunis ainsi en batterie, M. Ruhmkorff perce, au moyen de l'étincelle, des lames de verre de plus de 1 *centimètre* d'épaisseur!

1773. Effets chimiques de l'étincelle d'induction. — MM. E. Becquerel et Fremy ayant fait passer une série d'étincelles d'induction entre deux fils de platine, dans un tube rempli d'air, ont vu, au bout de quelques minutes, ce tube rempli de vapeurs rutilantes d'acide hypo-azotique, provenant de la combinaison de l'azote et de l'oxygène de l'air. M. Morren a formé de l'ammoniaque en combinant de l'hydrogène et de l'azote par le même moyen.

On peut faire jaillir l'étincelle d'induction à travers un liquide, et d'autant plus facilement qu'il est moins conducteur. Quand le liquide conduit notablement, comme l'eau, il faut que les électrodes, en platine, soient enveloppés de tubes de verre jusqu'aux extrémités, entre lesquelles on aperçoit un petit arc voltaïque. Dans l'eau acidulée, chaque fil de platine laisse échapper une gerbe d'étincelles, rouges au pôle positif, et violettes au pôle négatif. En même temps l'eau est décomposée, mais les gaz sont mélangés aux deux pôles. M. Grove

a reconnu que, si l'un des fils de platine est terminé par un petit plateau, toute la décomposition se concentre sur lui.

M. A. Perrot a étudié spécialement la décomposition des mélanges gazeux, et particuliérement de la vapeur d'eau[1]. Pour soustraire les produits de la décomposition à l'action de l'étincelle, et éviter les changements dans les proportions du mélange, il en fait passer un courant entre les fils de platine qui donnent l'étincelle. Par exemple, pour la vapeur, il remplit d'eau bien purgée d'air, un ballon dans le col duquel les fils de platine pénétrent tranversalement. Ce ballon est muni d'un tube abducteur s'engageant sous une éprouvette pleine d'eau purgée d'air et maintenue à une température de 90°. On fait bouillir l'eau du ballon, et quand une partie s'est vaporisée, on fait passer les étincelles, et l'on recueille dans l'éprouvette un mélange d'oxygéne et d'hydrogéne qui, examiné dans l'*eudiomètre* (1329), a laissé après la détonation, un faible résidu composé d'azote et d'oxygéne, provenant de l'air dissous dans l'eau de l'eudiométre. La décomposition n'est pas due à la chaleur du fil négatif, qui rougit ; car elle a lieu quand on l'empêche de rougir en activant le courant de vapeur ; et un fil de platine non interrompu, rendu incandescent par un courant voltaïque, ne décompose qu'une quantité insignifiante de vapeur.

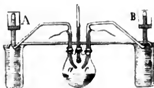


Fig. 1316.

Des étincelles, au moins aussi nombreuses, d'une puissante machine électrique de Ramsden, n'ont décomposé qu'une très faible quantité de vapeur. L'étincelle d'induction agit donc avec une bien plus grande énergie.

Masson avait admis, d'aprés ses expériences, que dans tous les milieux, une petite partie de la décomposition est produite par électrolyse, l'autre par l'action propre de l'étincelle agissant en tous les points de son parcours et probablement par la haute température qu'elle posséde. M. Perrot a démontré cette coexistence des deux modes de décomposition en faisant arriver les fils de platine aux extrémités de deux tubes *a*, *c* (*fig.* 1316), à travers lesquels la vapeur entraîne les gaz dégagés près de leur orifice. Dans l'éprouvette positive A, il a toujours trouvé un excès d'oxygéne, et dans l'éprouvette B un excès d'hydrogéne. Un voltamétre à sulfate de cuivre, placé dans le circuit, a donné un travail chimique bien inférieur à celui de l'étincelle, et à peine différent de celui qui correspond à la quantité de vapeur décomposée par électrolyse. La quantité décomposée par la décharge disruptive, se faisant en tous les points de l'étincelle, doit s'accroître avec sa longueur. C'est, en effet, ce qui a lieu, quand on a soin de comparer les résultats obtenus simultanément dans le même circuit avec le même nombre d'étincelles.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LXI, p. 161.

M. Perrot a décomposé par la même méthode, les vapeurs d'alcool, d'éther, d'acide acétique, le gaz ammoniac, et l'acide carbonique en oxyde de carbone et oxygène.

1774. Constitution de l'étincelle d'induction. — L'étincelle d'induction diffère essentiellement de l'étincelle des machines à frottement; tandis que celle-ci est formée d'un simple trait lumineux, l'étincelle d'induction des fortes machines se compose de deux parties, un trait brillant et une auréole souvent de forme ovoïde *ac* (*fig.* 1317), plus ou moins agitée et présentant une couleur rouge-orangé, avec teinte verdâtre du côté du pôle positif. Cette structure de l'étincelle, signalée par Masson, a été étudiée en détail par MM. Du Moncel [1], Perrot [2], Lissajous. M. Perrot considère l'auréole comme un courant d'électricité dynamique, et le trait brillant comme une décharge d'électricité statique; c'est l'auréole qui produit les décompositions par électrolyse qui s'observent dans les actions chimiques que produisent les étincelles d'induction (1773).

On pourrait croire que l'auréole est une expansion du trait brillant; mais il n'en est pas ainsi, et les deux parties sont indépendantes l'une de l'autre. Cela résulte des expériences qui suivent :

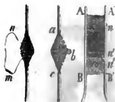


Fig. 1317.

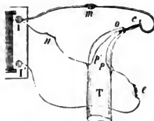


Fig. 1318.

1° tandis que le trait n'a pas de durée appréciable, l'auréole dure pendant un certain temps. Pour le prouver, M. Lissajous observe l'image de l'étincelle dans un miroir qu'il fait tourner dans sa main, et il voit que l'auréole s'étale en une longue bande de couleur fauve dont le trait brillant occupe l'extrémité postérieure; 2° si, comme l'a fait M. Du Moncel, on dirige le vent d'un soufflet à travers l'étincelle, l'auréole est entraînée en formant une nappe de teinte violacée, tandis que le trait n'est pas déplacé; 3° on peut, comme l'a fait M. Perrot, détourner le trait brillant, sans déplacer l'auréole, en approchant latéralement un corps *b*, que le trait vient lécher en prenant la direction *abc*, si le corps est mauvais conducteur, ou qu'il traverse, s'il est bon conducteur. On peut aussi détourner le trait, au moyen d'un fil métallique *nm*; et s'il y a une interruption *m*, il s'y produit une étincelle sans auréole; 4° entre deux fils parallèles AB, A'B', on obtient une auréole rectangulaire AA'B'B, dans laquelle le trait brillant affecte des positions variables *n*, *n'* *n''* d'un instant à l'autre, sans que l'auréole se déplace; 5° enfin, M. Perrot sépare complètement les deux parties de l'étincelle, par le moyen suivant : on

[1] *Recherches sur la non homogénéité de l'étincelle d'induction.* Paris, 1860.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LXI, p. 201.

fait jaillir l'étincelle, en *o* entre les extrémités de deux fils de platine *p. p'* (*fig.* 1318) communiquant avec les pôles I, I de la bobine de Ruhmkorff, et placés à l'orifice d'un tube T par lequel sort un fort courant d'air. Un conducteur I*mc* communiquant avec le pôle positif est présenté à l'étincelle; le trait passe en *o* entre les fils de platine, et l'auréole s'en sépare et se dirige suivant *oc*. Si l'on ménage une interruption en *e*, on a un trait à auréole; en *n*, le trait seul; et en *m*, l'auréole seule.

Des voltamètres placés en *m* et *e* ont donné les mêmes résultats, tandis qu'en *n* on n'obtient que des effets de tension. L'auréole représente donc la décharge de *quantité*, et le trait, la décharge de tension. En *n*, une feuille de papier est percée et non brûlée; dans l'auréole, dont on a séparé le trait, suivant *abc*, (*fig.* 1314) les corps combustibles prennent feu; un fil de verre, un fil de platine fondent, parce que cette auréole a une certaine durée.

Enfin les aimants puissants dévient l'auréole, qui s'étale en éventail, et sont sans influence sur le trait, à cause de son instantanéité.

1775. Lueurs produites à travers les mauvais conducteurs. — Si l'on applique, comme l'a fait M. Du Moncel, des plaques de métal communiquant avec les extrémités du fil induit, sur les faces extérieures de deux lames de verre séparées par une couche d'air de 2 ou 3^{mm} d'épaisseur, on voit dans l'obscurité, une pluie lumineuse d'une belle couleur bleue, qui paraît s'échanger entre les deux surfaces de verre, et il se dégage une vive odeur d'*ozone*. Si l'une des plaques métalliques est plus petite que l'autre, elle est entourée d'une auréole de lumière bleue rayonnant dans tous les sens. On peut ainsi, en appliquant sur la lame de verre une feuille d'étain découpée, obtenir un dessin qui se détache en noir sur un fond lumineux (*fig.* 1319). Si l'on remplace la feuille d'étain par une couche d'un liquide conducteur formant un dessin, le liquide paraît lumineux, et ses contours sont entourés de franges brillantes.



Fig. 1319.

Il n'est pas facile d'expliquer le passage de l'électricité entre les deux lames de verre; cependant, on peut rattacher ce phénomène à la polarisation moléculaire qui se fait dans les plus mauvais conducteurs, et à la pénétration lente de l'électricité à travers leur épaisseur (1349,1353). Dans tous les cas, les faces intérieures des lames de verre sont électrisées; car M. Du Moncel a vu de la limaille métallique osciller entre ces deux lames, comme dans l'appareil à grêle de Volta. D'un autre côté, M. Grove a découvert certains faits des plus curieux, qui montrent bien que les molécules des faces intérieures des lames de verre ont éprouvé, soit dans leur arrangement, soit dans leur nature, des modifications sensibles. Ayant fait l'expérience de M. Du Moncel, après avoir pressé entre les deux lames de verre une feuille de papier imprimée

d'un côté, il put, après avoir démonté l'appareil, voir les lettres apparaître nettement sur la surface du verre qui était en contact avec le côté imprimé, en soufflant simplement sur cette surface. L'ayant exposée ensuite à des vapeurs d'acide fluorhydrique, qui, comme on sait, attaquent le verre, les lettres se dessinèrent, d'une manière imparfaite, il est vrai, mais permanente, sous l'action corrosive des vapeurs acides. Ayant alors interposé entre les lames de verre des morceaux de papier découpés en forme de lettres, et ayant, après le passage du courant, exposé la surface du verre aux vapeurs acides, les lettres, d'abord invisibles, sortirent d'une manière très nette en donnant une reproduction permanente du mot qu'elles formaient.

1776. Lumière des courants induits dans le vide. — Nous avons déjà signalé, à propos de l'arc voltaïque (1537), les différences que présente la lumière électrique aux deux électrodes. Les courants d'induction à forte tension permettent d'observer plus facilement ces phénomènes, à cause de l'absence d'effets calorifiques énergiques. MM. Masson et Breguet ont pu, en effet, avec un appareil imparfait, distinguer dans le vide les apparences lumineuses différentes qui se manifestent aux deux électrodes quand l'intervalle qui les sépare est traversé par l'extra-courant. M. Ruhmkorff a étudié le même phénomène dans des conditions beaucoup plus favorables, avec sa bobine. Ayant fait le vide dans l'*œuf électrique* (*fig.* 1320), il a vu constamment se produire deux lumières différentes ; l'une de couleur violette, enveloppe complétement la boule et la tige par lesquelles arrive l'électricité négative ; l'autre, d'un rouge de feu, semble adhérente à la boule positive, et forme une sorte de corps ovale qui s'étend vers la boule négative. Si l'on introduit une résistance considérable dans le circuit induit, la lumière rouge disparaît autour de la boule positive, et est remplacée par une lumière bleue comme celle de la boule négative. Si l'on fait communiquer une des tiges seulement avec l'une des extrémités du fil induit, il ne se produit de lumière dans le vide qu'avec l'extrémité extérieure de ce fil ; ce qui prouve une fois de plus qu'il posséde une tension beaucoup plus forte que l'extrémité intérieure (1771). Quand le courant inducteur n'est pas trop intense, on peut, dans ce cas, dévier en tout ou en partie la gerbe lumineuse qui part de la boule, en approchant de la paroi du récipient un corps conducteur non isolé.

M. Gaugain a remarqué que, si l'on garnit de gomme laque l'une des boules de l'œuf électrique, ainsi que la tige qui la porte, en ne laissant qu'un point à découvert, et qu'on fasse arriver par cette boule les courants induits de rupture, qui seuls traversent le vide (1754), l'aiguille d'un réomètre placé dans le circuit se dévie de plus en plus à mesure que le vide est plus complet. Mais, si les courants induits marchent de la boule nue à la boule garnie, quand la pression descend au-dessous d'une certaine limite, la déviation décroît, devient nulle, et finit par changer de signe. Les courants qui passent librement, de la boule garnie à la boule nue, semblent donc ne pouvoir franchir l'œuf, sous une certaine pression, de la boule nue à la boule garnie ; l'œuf ainsi disposé se comporte

donc par rapport à l'électricité, comme une soupape par rapport aux liquides. C'est pourquoi M. Gaugain le nomme, quand il est ainsi disposé, *œuf-soupape* ou *soupape-électrique*.

1777. Stratification de la lumière électrique. — Peu de temps après l'invention de la bobine de Ruhmkorff, M. Grove, dans des recherches sur les taches que produit la décharge induite de cet appareil, sur des plaques métalliques disposées à l'électrode positif ou négatif, fut conduit à expérimenter dans l'air très raréfié contenant différentes vapeurs. Ayant opéré dans le vide fait sur du phosphore, il vit la lueur qui joignait les deux boules, divisée en couches minces transversales brillantes, séparées par des couches sombres continuellement agitées [1]. Ce phénomène, désigné sous le nom de *stratification de la lumière électrique*, était découvert vers la même époque par M. Ruhmkorff, et par M. Quet, dans le vide fait sur la vapeur d'alcool.



Fig. 1320.

M. Quet a fait une étude attentive de la lumière stratifiée [2]. On serait porté à attribuer le phénomène aux intermittences des décharges ; mais il se manifeste de la même manière quand on ne fait passer qu'un seul courant induit, en soulevant à la main le marteau de l'appareil d'induction. De plus, nous avons vu que M. Despretz a obtenu des stratifications dans l'arc voltaïque produit par le courant continu d'une pile puissante (1437). Pour obtenir de belles stratifications, M. Quet fait le vide dans l'œuf électrique contenant des vapeurs d'esprit de bois, ou d'essence de térébenthine, d'alcool, d'huile de naphte, de bichlorure d'étain, etc., ou enfin renfermant du fluorure de calcium, puis il fait communiquer les électrodes *a* et *b* avec les colonnes de l'appareil de Ruhmkorff, et il soulève le marteau avec la main, de manière à ne faire passer qu'un courant induit à la fois. On voit alors les stratifications se dessiner nettement, sans être gênées par les mouvements vibratoires ou gyratoires qui se manifestent quand le marteau oscille très rapidement, et l'on peut reproduire le phénomène aussi souvent que l'on veut. La *fig.* 1120 donne une idée de l'aspect que présente la lumière stratifiée. La boule positive *b* est enveloppée, ainsi que la tige qui la porte, de trois couches de lumière violette, dont la seconde est beaucoup plus sombre que les deux autres ; puis vient un espace obscur, et enfin des couches alternativement rouges et sombres qui s'étendent jusqu'à la boule positive. Ces bandes sont courbes ; M. Quet en a obtenu de sensiblement planes en opérant dans un récipient cylindrique, avec l'essence de térébenthine.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXVII, p. 376.
[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. IV, p. 143.
[3] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XXXV, p. 949.

Du reste, les apparences de la lumière stratifiée, le nombre et l'épaisseur des couches, dépendent de la nature des vapeurs employées et de la tension du courant induit. Dans le vide fait sur le fluorure de silicium, le pôle négatif est entouré d'une lumière jaune ; dans la vapeur d'essence de térébenthine, le pôle positif est entouré de lumière blanche. Avec 30 couples et l'adjonction d'un condensateur, il n'y a plus de stratifications, et l'œuf semble rempli de gaz d'éclairage enflammé et de couleur uniforme.

Tubes de Geissler. — La disposition des stratifications dépend aussi de la forme des récipients. M. Geissler, artiste à Bonn, fabrique des tubes à ampoules de formes très variées, fermés hermétiquement à la lampe, après qu'on y a fait le vide, en y laissant des traces de vapeurs diverses. La *fig.* 1321 représente un de ces tubes ; les extrémités du fil induit sont mises en communication avec des fils de platine *n*, *p*, scellés dans le verre. Les strates sont ordinairement convexes vers le fil négatif *n*, qui est enveloppé d'une auréole

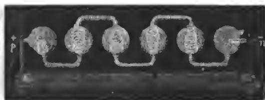


Fig. 1321.

mince et brillante, autour de laquelle règne une lumière douce et sans stratifications. Les strates sont d'autant plus brillantes et plus épaisses que le tube est plus étroit au point où on les observe. En même temps, les parois du tube présentent un éclat particulier dont nous aurons à parler dans l'optique, et qui est désigné sous le nom de *fluorescence*.

M. Gassiot a étudié les stratifications au moyen de tubes de Geissler, dans lesquels il faisait le vide, après les avoir remplis de divers gaz[1]. Ces tubes contenaient des traces de vapeurs de mercure : pour avoir un vide plus parfait, il employait un moyen imaginé par M. Andrews, qui consiste à introduire dans le tube de l'acide carbonique et de la potasse caustique. En chauffant plus ou moins, il rendait plus ou moins complète l'absorption du gaz par la potasse, et pouvait opérer sous des pressions graduées à volonté. Il reconnut ainsi que les stratifications qui partent du fil positif, s'étendent de plus en plus vers le fil négatif, à mesure que le vide est plus parfait, et deviennent plus distinctes ; puis, quand l'absorption du gaz est complète, auquel cas on a un vide supérieur à celui du baromètre, il n'apparaît plus de lumière, et un réomètre ou un tube de Geissler contenant des vapeurs, introduits dans le circuit, ne pré-

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LIV, p. 243, et LV, p. 241.

sentent ni déviation, ni effets lumineux, ce qui prouve *qu'un espace vide ne laisse pas passer l'électricité.* — Au lieu d'employer l'étincelle d'induction, M. Gassiot a aussi employé celle de sa pile à eau de 3,520 auges isolées (1454), ou une pile de Grove de 400 couples, et il a obtenu la stratification dans le tube vide d'acide carbonique, quand il y faisait passer le courant par étincelles de 5^{cm} de longueur. — M. Riess a reconnu que, lorsqu'on approche un corps conducteur d'une partie renflée des tubes de Geissler, la lumière est attirée, et que l'on entend un pétillement produit par de petites étincelles qui jaillissent entre ce corps et le verre; il y a donc électrisation par influence de la surface extérieure du verre, et l'on peut, au moyen du plan d'épreuve, reconnaître qu'une partie des tubes, électrisée positivement, est séparée de l'autre électrisée négativement, par une ligne neutre, qui est placée au milieu si le tube a une forme symétrique. L'espace sombre qui existe autour du fil négatif ne donne que des signes très faibles d'électricité[1].

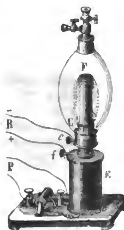


Fig. 1322.

Usages de la lumière stratifiée. — M. Plucker a étudié l'action des aimants sur la lumière stratifiée, et il a reconnu qu'elle est attirée ou repoussée, comme l'arc voltaïque, par les électro-aimants (1535). Mais ce qu'il y a de curieux, c'est qu'il a pu obtenir des *courbes magnétiques*, non pas dans un plan, comme quand on produit le *spectre magnétique*, mais dans l'espace. Pour cela, il engage entre les pôles d'un électro-aimant la sphère négative *n* (*fig.* 1321), dans laquelle s'enfonce jusqu'au centre un fil de platine garni de verre, excepté à son extrémité. Dès que l'électro-aimant est en activité, la lueur uniforme qui remplit la sphère *n* dessine des lignes magnétiques brillantes dont la couleur dépend de la nature de la vapeur sur laquelle est fait le vide. Comme la résultante des actions d'un aimant sur un élément de courant est proportionnelle au sinus de l'angle que fait l'élément avec cette résultante (1660), on voit qu'il y aura équilibre quand l'angle sera nul; les courbes magnétiques jouissent donc de la propriété d'être tangentes à chaque point à la direction de la résultante en ce point[2].

2° M. de La Rive a répété, au moyen des courants induits traversant le vide fait sur diverses vapeurs, son expérience sur l'influence du magnétisme sur la lumière électrique dans le vide (1410)[1]. La *fig.* 1322 représente l'appareil dont il se sert. CF est un cylindre en fer doux, appuyé sur un électro-aimant

[1] Cosmos, *Revue des progrès des sciences*, t. XV, p. 260.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LIV, p. 239.

E, et pénétrant dans l'œuf électrique par une tubulure inférieure. Ce cylindre, qui communique avec le bouton extérieur *f*, est enveloppé, excepté à ses extrémités, d'une couche isolante formée d'un tube de verre dont les deux faces sont garnies de gomme laque. Un anneau en cuivre C entoure cette couche isolante à la partie inférieure, et communique avec le bouton *c*. Quand on attache au bouton *f* l'extrémité positive du fil induit de la bobine de Ruhmkorff, et au bouton *c* l'extrémité négative, on voit dans l'œuf vide une gerbe lumineuse cylindrique, qui va de l'extrémité F à l'anneau C, et dans laquelle on distingue des jets plus brillants que les autres. Si alors on lance un courant dans la bobine E, de manière à aimanter le cylindre CF, la lumière prend une nouvelle disposition et se met à tourner rapidement autour de CF dans un sens qui dépend de celui de l'aimantation du fer, en présentant ainsi un nouvel exemple de la rotation des courants par les aimants (1716). Si l'on change le sens du courant induit, les phénomènes sont moins brillants, à cause de l'espace obscur qui existe autour de l'électrode négatif.

3° Pour expliquer ce fait, que les queues des comètes sont dirigées du côté opposé au soleil, M. Faye a émis l'hypothèse d'une action répulsive exercée par la chaleur solaire sur la matière très rare qui compose les comètes. Pour appuyer cette hypothèse, M. Faye, avec l'aide de M. Ruhmkorff, a cherché si un corps incandescent exercerait une action répulsive sur la vapeur très raréfiée qui sert de véhicule à la lumière stratifiée. Les stratifications étaient produites dans un récipient à robinet, entre deux tiges horizontales à boules, très rapprochées d'un plateau métallique sur lequel la cloche était mastiquée, et au centre duquel était une rondelle mince en platine, portée au rouge par un double courant d'air et de gaz enflammé. Les strates s'écartaient à une distance de 1 centimètre environ de cette rondelle, quand elle était incandescente, comme si elles avaient éprouvé une répulsion [1].

1778. De la cause des stratifications. — M. Gaugain a fait un grand nombre d'expériences pour expliquer la stratification de la lumière électrique, en se plaçant dans des conditions bien déterminées [2]. Il a trouvé que : 1° dans un récipient parfaitement nettoyé, avec les boules et les tiges de cuivre bien polies et non vernies, il n'y a pas de stratifications, et la tige positive se trouve enveloppée d'une lumière d'aspect floconneux et d'une couleur rosée ; 2° si le vide est fait dans une vapeur *combustible*, il y a stratification, et l'œuf présente l'aspect de la *fig.* 1320 ; 3° quand l'expérience se prolonge pendant longtemps, les stratifications finissent par disparaître ; 4° si le vide est fait dans un mélange d'air et de vapeur combustible, les couches sont d'autant plus nombreuses et plus minces, et elles persistent d'autant plus que l'air contient plus de vapeur. M. Gaugain conclut de ces résultats, que les stratifications sont dues à la combustion des vapeurs. Il cherche à prouver que les couches sont

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. L, p. 894 et 959.
[2] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XL, p. 1036.

formées de matière pondérable, en montrant qu'elles s'abaissent toutes ensemble au moment où l'on aspire l'air par le robinet inférieur, et qu'elles remontent, au contraire, et semblent s'entasser près de la boule supérieure, au moment où l'on fait rentrer un peu d'air.

M. Grove n'adopte pas cette explication. Il montre d'abord que les stratifications dépendent de la manière dont se fait la rupture du circuit inducteur ; si le manche du marteau est appuyé sur un ressort flexible, les couches lumineuses sont plus minces et plus nombreuses que si ce ressort est rigide. C'est que la rupture ne se fait pas aussi brusquement qu'on pourrait le croire ; elle est accompagnée de quelques oscillations, pendant lesquelles le courant induit éprouve des intermittences d'intensité très rapides, et c'est à ces intermittences qu'on attribue généralement aujourd'hui les stratifications. Pour rompre le circuit aussi brusquement que possible, M. Grove le ferme avec deux gros fils de cuivre croisés, et fait glisser très rapidement l'un d'eux jusqu'à ce que son extrémité quitte l'autre. Alors, le plus souvent, il n'y a plus de stratifications. A l'appui de l'explication qui précède, nous citerons les expériences de M. Van Der Willingen, qui a obtenu les stratifications dans l'œuf contenant des vapeurs d'essence de bergamote, au moyen de la décharge d'un condensateur, à la condition de la faire passer par une corde mouillée, pour la ralentir, et de manière qu'elle soit en réalité une succession de décharges partielles, dont chacune donne lieu à une bande lumineuse séparée de la suivante par une bande obscure [1]. Les observations de M. Despretz, sur les stratifications qui se manifestent avec un courant continu, ne sont pas une objection à cette explication ; car il est bien difficile d'admettre une absence complète d'intermittences dans un courant aussi intense que celui qu'il employait, surtout quand on se rappelle qu'il y a arrachement et transport de particules des charbons entre lesquels jaillit l'arc voltaïque.

1779. Applications de l'appareil de Ruhmkorff. — Nous avons parlé de l'application qu'a faite M. Lenoir, de la bobine de Ruhmkorff à son moteur à gaz (II, 1030). MM. Du Moncel et Liais ont eu l'idée de se servir de l'étincelle du même appareil pour allumer à distance le gaz d'éclairage, en la faisant jaillir en avant du bec, entre deux fils de platine communiquant avec la machine d'induction, par de longs fils métalliques. Le premier essai a été fait à la mire de nuit de l'Observatoire de Paris. La bobine et le robinet qui réglait la sortie du gaz étaient placés dans une des salles de l'établissement, d'où l'on pouvait allumer la mire et l'éteindre à volonté.

M. Trève a appliqué le même procédé aux signaux de nuit que l'on fait en mer avec des fanaux, ordinairement au nombre de cinq. Dans la méthode ordinaire, il faut les hisser les uns au-dessus des autres, et chaque fois que l'on veut changer un signal, descendre ceux qui doivent être supprimés et hisser, après les avoir allumés, ceux qui doivent être ajoutés. Ces manœuvres sont longues et

[1] *Pogg. Ann.*, t. XCVII, p. 494 ; et *Ann. de ch. et de ph.*, 3e série, t. L, p. 126.

souvent incertaines et difficiles quand le vent est fort. M. Trève laisse les fanaux à poste fixe, et fait communiquer chacun d'eux, par des fils de cuivre, avec la machine de Ruhmkorff, et par un tube en caoutchouc, avec un gazomètre rempli de gaz. On les allume à volonté au moyen de l'étincelle d'induction, et l'on éteint instantanément les feux qui doivent disparaître, au moyen de robinets adaptés à chaque tube, tout près du gazomètre.

Inflammation des mines. — Pour enflammer la poudre des fourneaux de mine, on emploie des tubes en toile remplis de poudre, ou *saucissons*, qui communiquent, à la surface du sol, avec une traînée de poudre. A l'extrémité de cette traînée, est allumé un morceau d'amadou dont la longueur est calculée de manière que la poudre ne s'enflamme qu'après un temps donné. Ce procédé présente plusieurs sortes de dangers, provenant de l'incertitude du moment de l'explosion, et de ce que l'on ignore si la mèche des mines qui n'ont pas réussi est bien entièrement éteinte. En outre, il est souvent important, d'enflammer plusieurs mines au même instant, afin d'obtenir des ébranlements simultanés et, par suite, plus efficaces. Enfin, quand il s'agit de mines monstres, comme celles que MM. Dussaud et Rabattu ont employées à Alger, et plus récemment dans le creusement d'un bassin au port de Cherbourg, où ils ont pu détacher d'un seul coup 50,000 mètres cubes de rocher, il arrive souvent que la poudre ne s'enflamme pas en totalité, et que l'effet est bien au-dessous de celui qu'on était en droit d'attendre de l'énorme quantité de poudre dépensée.

Tous ces inconvénients disparaissent quand on se sert de l'électricité pour mettre le feu aux mines. On a d'abord pensé à faire rougir, au moyen d'un courant, un fil de platine plongé dans la poudre. C'est à M. Hare qu'est due la première idée de cette méthode, que M. Roberts a rendue pratique. Mais le grand nombre de couples qu'il faut employer, à cause de la grande longueur que doit avoir le circuit, constitue une difficulté réelle dans les applications. M. Du Moncel a songé le premier à employer l'étincelle de l'appareil de Ruhmkorff, laquelle peut être fournie par un seul couple, ou même par le courant continu d'une machine magnéto-électrique. Mais il s'est présenté tout d'abord un obstacle inattendu : la puissance calorifique des étincelles d'induction est tellement faible, qu'on peut les faire jaillir à travers la poudre, sans l'enflammer. M. Ruhmkorff a levé la difficulté au moyen des fusées de M. Stateham, que ce dernier imagina, en voyant des étincelles passer à travers l'enveloppe de gutta-percha, par une fissure qui s'était formée dans un des fils du câble sous-marin du télégraphe de Calais à Douvres. Pour confectionner ces fusées, on prend deux fragments de fil de cuivre *f*, *f'* (*fig.* 1323), recouverts de gutta-percha ; on les entortille et on les recourbe de manière à rapprocher leurs extrémités dépouillées de l'enveloppe isolante, comme on le voit en *o*. On fait ensuite entrer ces extrémités dans un bout de tube en gutta-percha vulcanisée, c'est-à-dire soufrée, que l'on a enlevé d'un fil de cuivre qu'il recouvrait depuis longtemps, et dans lequel on a pratiqué une échancrure qui permet de voir les extrémités *o* des fils *f*, *f'*. On garnit ces extré-

mités de fulminate de mercure, on remplit l'échancrure de poudre et on l'enfonce dans une cartouche remplie de poudre. Le tube en gutta-percha est garni en dedans d'une couche de sulfure de cuivre qui s'est formée aux dépens du fil qu'il recouvrait, et c'est ce sulfure qui, en s'enflammant par l'étincelle d'induction, détermine l'explosion de la poudre. Il faut toujours essayer d'avance la fusée, car s'il n'y avait pas assez de sulfure de cuivre, l'inflammation pourrait ne pas avoir lieu, et s'il y en avait trop, le courant induit, trouvant dans cette substance un bon conducteur, passerait sans étincelles. Dans des expériences faites à la Villette par M. Ruhmkorff et M. le colonel Verdu, on put enflammer la poudre à une distance de 26,000 mètres, soit avec un circuit formé de deux fils, soit en remplaçant un des fils par la terre qui, comme nous le verrons, peut servir à fermer le circuit.



Fig. 1323.

On peut faire partir plusieurs mines en même temps; mais l'affaiblissement des courants induits, par les solutions de continuité, empêche de pouvoir opérer sur plus de 4 ou 5 à la fois. Le capitaine Savare a alors imaginé de faire communiquer chaque mine avec un circuit principal, au moyen de fils de dérivation. Les extrémités *o* du fil de la fusée sont faites en alliage fusible. L'étincelle jaillit d'abord là où il y a le moins de résistance; l'explosion a lieu, l'alliage fusible fond, et les courants induits sont forcés de passer par une autre mine, et ainsi de suite jusqu'à ce que toutes aient éclaté dans un temps très court. — M. Du Moncel emploie une disposition plus sûre : chaque fourneau de mine communique, d'une part avec un fil commun adapté à l'appareil de Ruhmkorff, et d'autre part avec un distributeur formé d'une roue épaisse en gutta-percha, sollicitée à tourner par un ressort de pendule. Le contour de cette roue porte des plaques métalliques en relation avec des anneaux placés sur les faces, et sur lesquels s'appuient des languettes avec lesquelles on fait communiquer les différents fourneaux. Un ressort s'appuie sur le contour de la roue et communique avec l'appareil d'induction. Quand la roue tourne, le courant induit est lancé dans le circuit qui aboutit à la plaque que touche la lame de cuivre. Il suffit donc de retirer un cliquet qui retient la roue, pour qu'elle tourne vivement, et que les explosions se fassent successivement dans toutes les mines, avec une rapidité telle qu'on peut les regarder comme simultanées.

V. Magnétisme par mouvement.

1780. Rotation d'un aimant par un disque tournant. — Arago a découvert, en 1824[1], que les corps conducteurs en mouvement tendent à

[1] *Ann. de ch. et de phys.*, 3e série, t. XXVII, p. 363; XXVIII, 325; XXXII, 213.

entraîner les aimants placés à une petite distance de leur surface. Ce phénomène, resté d'abord sans explication, a été rattaché depuis à l'induction magnéto-électrique; voici comment il a été découvert. Arago ayant fait osciller une aiguille aimantée dans une boîte en cuivre, remarqua que l'amplitude décroissait avec une grande rapidité, et que l'aiguille s'arrêtait après 3 ou 4 oscillations, quand elle était très près du fond de la boîte, comme si elle eût été plongée dans de l'eau. Ayant ensuite placé la même aiguille très près de la surface de différentes plaques, il reconnut que le décroissement de l'amplitude dépendait de la nature de ces plaques, qu'il était beaucoup plus prononcé avec les métaux qu'avec toute autre substance, et d'autant plus faible que la distance était plus grande. Tous ces résultats ont été confirmés dans la même année par M. Seebek. Nous avons signalé l'application qui a été faite de cette propriété, pour amortir les oscillations des aiguilles des réomètres (1608).

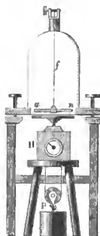


Fig. 1324.

Puisque le voisinage d'une plaque métallique ralentit les oscillations d'un aimant, il était naturel de penser que, si la plaque était en mouvement, elle pourrait entraîner l'aimant. C'est ce qu'Arago s'est empressé de vérifier. La *fig.* 1324 représente l'appareil qu'il a fait construire pour ces nouvelles expériences. *an* est un aimant suspendu par un fil sans torsion *f*, tout près d'un disque de métal, dont le centre se trouve sur le prolongement du fil. Ce disque reçoit d'une horloge H, toute en cuivre, un mouvement de rotation autour d'un axe vertical passant par son centre. Une feuille de papier ou de parchemin tendue au-dessus, empêche l'agitation de l'air de se faire sentir sur l'aimant. Quand le disque tourne, l'aiguille est entraînée dans le sens du mouvement, puis s'arrête, en faisant avec le méridien magnétique un angle qui dépend de la substance du disque et de son épaisseur. Cet angle augmente avec la vitesse de rotation, et semble, entre certaines limites, lui être proportionnel. D'après M. Harris et M. Abria, le *sinus* de la déviation est proportionnel à la vitesse de rotation, du moins jusqu'à celle de 12 tours par seconde, qui n'a pas été dépassée dans leurs expériences. L'action diminue avec la distance, et plus rapidement que le carré. Quand la vitesse est assez grande pour que l'aimant éprouve une déviation un peu supérieure à 90°, il se met à tourner d'une manière continue dans le sens du disque. Enfin, si l'on pratique des fentes dans ce dernier, suivant les rayons, comme on le voit (*fig.* 1325), l'effet est nul, ou du moins considérablement affaibli.


Fig. 1325.

Ces phénomènes ont reçu le nom de *magnétisme de rotation* ou de *magnétisme par mouvement*. Pour les mettre en évidence, on emploie divers

appareils, dans lesquels un arbre vertical reçoit un mouvement de rotation d'un engrenage ou d'une corde sans fin. On fixe à cet arbre le disque, qu'on recouvre d'une feuille de parchemin tendue sur un cadre. L'aimant est équilibré sur une pointe courte, dont le pied, large et mince, s'appuie sur la membrane tendue. Ampère et Colladon ont reproduit tous les phénomènes, en employant un solénoïde au lieu d'aimant. Prévost et Colladon ont reconnu qu'il n'y a aucune action quand l'aiguille est suspendue dans un tube vertical en cuivre, tournant autour de son axe. Ils ont obtenu, au contraire, des résultats intenses, avec un disque au-dessus duquel était suspendu un levier portant à ses extrémités deux aimants verticaux dont les pôles inférieurs étaient de nom contraire. Quand ces pôles étaient de même nom, il n'y avait plus d'action. Gay-Lussac a trouvé qu'une aiguille de fer doux reste indifférente à l'influence d'un disque tournant ; et de Haldat, qu'il se produit un effet sensible, avec une aiguille aimantée aussi faiblement que possible, et que l'intensité d'action croît avec le degré d'aimantation.

1781. Composantes de la force qui agit sur l'aimant. — Arago a découvert que. indépendamment de la composante qui entraîne l'aimant et qui est parallèle au disque et perpendiculaire à son rayon, il existe deux autres composantes, l'une perpendiculaire au disque, l'autre parallèle à son rayon. La première se reconnaît en suspendant l'aimant verticalement au bassin d'une balance en équilibre, au-dessus du disque tournant ; l'aimant est repoussé, quel que soit celui des deux pôles qui se trouve en bas, et avec une force d'autant plus grande, que la distance est plus petite et la vitesse du disque plus grande. Cette force se mesure par le poids qu'il faut ajouter du côté de l'aimant pour maintenir l'équilibre ; elle ne se manifeste plus quand l'aimant est exactement au-dessus du centre. — Pour constater la composante parallèle au rayon, on approche du disque une aiguille verticale mobile dans un plan vertical qui passe par le centre. Quel que soit le pôle inférieur, il est repoussé tant que l'aiguille reste en dehors du disque, comme en *a* (*fig.* 1326). La répulsion diminue à mesure qu'on avance vers le centre, devient nulle et l'aiguille, *b*, se tient verticalement ; puis la force change de sens, comme on le voit en *c*, augmente d'abord d'intensité, pour diminuer ensuite et redevenir nulle, en *o*, au-dessus du centre.



Fig. 1326.

1782. Circonstances qui influent sur l'intensité de l'action. — A peine les expériences d'Arago étaient-elles connues, que divers physiciens s'empressèrent de les répéter et de chercher les circonstances qui peuvent modifier l'action du disque tournant sur l'aimant. MM. J. Herschell et Babbage ont publié un grand travail sur ce sujet [1]. Ils ont répété l'expérience d'Arago en la renversant ; un aimant en fer à cheval disposé comme celui de la machine de Pixii (1727) tournait au-dessous d'un disque suspendu par un

[1] *Bibliothèque universelle de Genève* (Sciences et arts), t. XXIX (1825), p. 254.

faisceau de fils sans torsion ; ce disque se mit à tourner dans le même sens que l'aimant.

M. Matteucci fait l'expérience de la manière suivante : Il suspend de la même manière qu'un fléau de balance, un disque de cuivre entre les pôles contraires d'un électro-aimant. Ce disque, qui fait un grand nombre d'oscillations avant de s'arrêter quand l'électro-aimant ne reçoit pas de courant, s'arrête après deux ou trois oscillations, quand le courant circule. Un disque de fer oscille, au contraire, beaucoup plus rapidement dans le dernier cas.

M. Harris a reconnu que des plaques de métaux non magnétiques, interposées entre l'aimant et le disque tournant, peuvent détruire l'action de ce dernier, quand elles ont une épaisseur considérable, par exemple de 8 à 12 centimètres C'est, sans doute, pour n'avoir pas employé les plaques sous une épaisseur suffisante, que divers physiciens ont trouvé que leur interposition n'avait pas d'influence.

MM. Herschell et Babbage ont comparé les actions exercées à la même distance sur un même aimant, par des disques égaux de différentes substances, tournant avec la même vitesse. En prenant pour unité l'action exercée par le cuivre, ils ont trouvé les résultats suivants : *zinc* 0,90 ; *étain* 0,47 ; *plomb* 0,25; *antimoine* 0,11 ; *bismuth* 0,01. L'argent paraît se rapprocher du cuivre ; l'or a donné de faibles résultats, mais il paraît que son épaisseur était plus petite que celle des autres disques. Le charbon de cornue a produit une action marquée ; mais les substances peu ou pas conductrices, comme le verre, la résine, le bois n'en ont produit aucune. On voit que les métaux de la liste ci-dessus sont placés par ordre de conductibilité (1635). Les substances qui conduisent le mieux sont donc celles qui agissent le plus ; M. Christie est même parti de là pour comparer les conductibilités des différents métaux. Cependant les métaux magnétiques forment une exception facile à concevoir ; de Haldat a reconnu que le fer doux agit avec plus d'énergie que toute autre substance, tandis que l'acier ne produit aucun effet.

MM. Herschell et Babbage ont aussi vérifié l'influence des fentes suivant les rayons du disque. Ils ont constaté, en outre, que si l'on soude les fentes avec différents métaux, l'action se reproduit, avec une intensité qui dépend de la nature de la soudure, par exemple, un disque de cuivre, dont l'action est représentée par 1, ayant été fendu, son action ne fut plus que 0,20 ; les fentes ayant été soudées avec de l'étain, l'action devint égale à 0,91. Un disque de bronze n'avait plus, après avoir été fendu, qu'une force égale à 0,24 de celle qu'il possédait d'abord. Les fentes ayant été soudées avec du bismuth, cette force devint égale à 0,53, et en employant l'étain pour soudure, à 0,38. Si les fentes étaient remplies avec les mêmes métaux en limaille ou en fils fins, l'action était à peine augmentée.

On doit à MM. Barlow et Marsh des expériences curieuses sur l'action qu'exerce un boulet de fer tournant, sur une aiguille de fer aimantée soustraite

à l'action de la terre [1]. L'aiguille était placée tantôt tangentiellement à la sphère, tantôt normalement à l'axe de rotation, que l'on plaçait dans différentes directions. Le pôle nord de l'aiguille était attiré ou repoussé, suivant qu'elle était placée au nord ou au sud du globe tournant, ce qui prouve que le magnétisme terrestre agissait sur le fer du boulet. Un fait remarquable, c'est que l'aiguille, qui est influencée de la même manière par une sphère massive ou creuse en repos, éprouve une action beaucoup plus vive de la part d'une sphère massive que d'une sphère creuse, quand il y a mouvement. Par exemple, la déviation de l'aiguille étant de 15°5′ avec une sphère creuse faisant 640 tours par minute, cette déviation devint de 28°24′ avec un boulet massif de même diamètre, toutes les autres conditions de l'expérience restant les mêmes.

1783. Lois du magnétisme de rotation. — Ces lois sont relatives à la manière dont varie, avec la vitesse de rotation du disque, son épaisseur et sa distance à l'aimant, l'action exercée sur ce dernier. Les physiciens ne se sont guère occupés que de la composante tangentielle. Pour en évaluer l'intensité, ils ont employé tantôt les oscillations de l'aimant sur le disque en repos, tantôt la déviation de l'aimant produite pendant la rotation. Dans ce dernier cas, la composante est proportionnelle au *sinus* de l'angle de déviation, puisqu'elle fait équilibre à l'action terrestre, qui est elle-même proportionnelle à ce *sinus*.

Par cette dernière méthode, M. Harris a trouvé que *la force tangentielle est proportionnelle à la vitesse de rotation du disque*. Ce disque faisait successivement 178, 357 et 714 tours par minutes, et les *sinus* des déviations étaient entre eux comme les nombres 1, 2 et 4. M. Matteucci a vérifié cette loi, en mesurant la force par l'angle de torsion d'un fil métallique servant à suspendre le disque de cuivre au-dessus d'un électro-aimant tournant.

M. Abria [2] a constaté la loi qui nous occupe, en en vérifiant par l'expérience les conséquences mathématiques. Dans le cas d'une aiguille oscillant sur un disque fixe, il résulte des calculs de Poisson que, pour les petites oscillations, et si l'on suppose les résistances émanant du disque, proportionnelles aux vitesses, les amplitudes successives forment une progression géométrique décroissante dont la raison est

[1] $\beta = e^{-\pi \frac{\sqrt{ga}}{2\gamma k}}$, dans laquelle on a $\gamma = \sqrt{1 - \frac{ga}{4k^2}}$

g est la pesanteur, a la demi-longueur de l'aimant oscillant, k une constante, et e la base des logarithmes népériens.

Pour vérifier cette conséquence de la loi, M. Abria pose transversalement sur l'aimant oscillant, une aiguille en ivoire portant à ses extrémités des arcs divisés. L'aimant étant en repos, il vise, avec une lunette fixe, une division,

[1] *Bibliothèque universelle de Genève* (Sciences et arts), t. XXIX (1825), p. 257.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XLIV, p. 172.

la 10ᵉ, par exemple ; puis, faisant osciller l'aimant, il observe quelles divisions n, n', n''... paraissent coïncider avec le fil du réticule, à la fin de la 2ᵉ, de la 4ᵉ, de la 6ᵉ... oscillation. Il est évident que les amplitudes sont n-10, n'-10, n''-10... et l'expérience montre qu'elles forment une progression géométrique.

M. Abria a aussi procédé par la méthode des déviations. Le calcul montre que, si la loi est vraie, on a pour le *sinus* de l'angle de déviation θ_n, quand la plaque fait n tours par seconde,

$$\sin \theta_n = -\frac{4}{\pi \log e} n T \gamma \log \beta = -2{,}932 n T \gamma \log \beta,$$

en représentant par T la durée d'une oscillation faite par l'aimant sous l'influence de la terre. L'expérience a donné des résultats suffisamment d'accord avec ceux que donne le calcul.

M. Abria a reconnu, en faisant osciller au-dessus du disque, un aimant dont il augmentait graduellement l'intensité, que la force tangentielle croît à peu près proportionnellement à la force magnétique, et que cette loi est indépendante de la distance.

Les lois relatives à la distance et à l'épaisseur sont mal connues. M. Matteucci a reconnu que la force tangentielle augmente avec l'*épaisseur* du disque, mais moins rapidement ; ce qui tient à ce que les différentes couches sont à des distances différentes de l'aimant.

La loi relative aux distances a été étudiée par MM. Christie, Prévost, Colladon et Harris. Ce dernier trouve que la composante tangentielle varie en raison inverse du carré de la distance ; mais les résultats doivent dépendre de l'épaisseur, les différentes couches placées à des distances différentes étant inégalement influencées par l'aimant.

1784. Explication du magnétisme de rotation. — Le magnétisme de rotation n'a pu recevoir d'explication satisfaisante qu'après la découverte de l'induction magnéto-électrique. Plusieurs physiciens, entr'autres MM. J. Herschell et Babbage, l'avaient attribué à un développement de magnétisme proprement dit dans le disque, sous l'influence des pôles de l'aimant. Ce magnétisme, contraire à celui du pôle qui le produisait, persistait pendant quelques instants, dans les parties du disque qui s'éloignaient de l'aimant, et entraînait ce dernier. Mais l'absence de toute trace de polarité magnétique dans le disque en repos, n'a pas permis d'admettre cette explication. Cependant, Poisson ayant soumis cette hypothèse au calcul, en partant de certaines suppositions, est parvenu à retrouver les trois composantes d'Arago. Ces savants calculs sont devenus inutiles, depuis que la découverte des courants d'induction est venue donner la clé de ce curieux phénomène.

Courants dans le disque tournant près d'un aimant. — Aussitôt après la découverte des courants induits, M. Faraday eut l'idée de rapporter le magnétisme de rotation à des courants développés dans le disque tournant, par

les pôles de l'aimant voisin. Dans son premier Mémoire sur l'induction [1], on trouve un grand nombre d'expériences dans lesquelles il a dérivé une partie de ces courants, à travers un réomètre. Considérons une plaque métallique rectangulaire AB(*fig.* 1327), que l'on fait marcher dans le sens de la flèche *s*, *au-dessous* du pôle d'un aimant N, dans lequel le sens des courants d'Ampère est indiqué par les flèches. Les bords de la plaque glissent sur les extrémités *fixes*, *r*,*r'* du fil d'un réomètre, appuyées en deux points de la droite *rr'* qui rencontre l'axe de l'aimant. Pendant le mouvement de la plaque, le réomètre indique un courant allant de *r'* en *r* dans la plaque. Si le fil *r* est attaché à la plaque en *f*, le courant va à travers celle-ci, de *r'* en *f*; et si ce fil est en *f'*, il va de *r'* en *f'*. — Le sens du courant change quand la plaque revient sur ses pas. Ce sens change aussi quand le pôle est placé *au-dessus* de la plaque, ou quand on le remplace par le pôle contraire. — Il résulte de là que, si la plaque glisse entre deux pôles magnétiques opposés, les actions de ces deux pôles s'ajoutent. — Quand les communications avec le réomètre sont en *r* et *r'*, le courant allant dans le sens *r'r*, si l'on enlève les fils *r*, *r'*, ce courant pourra se décharger à travers la plaque, en formant des circuits *m* et *n*. Comme les courants induits demandent un certain temps pour se développer, la ligne suivant laquelle marche le courant *r'r* ne passe pas par l'axe de l'aimant, mais elle est un peu en avant, en *ab*. Il résulte de là que la partie antérieure de l'aimant sera plus vivement attirée par *ab* que la partie postérieure n'est repoussée, et l'aimant tendra à marcher dans le sens de la plaque.

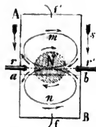


Fig. 1327.

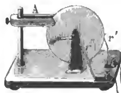


Fig. 1328.

Pour montrer l'existence des courants induits dans un disque tournant en présence d'un aimant, M. Faraday a employé l'appareil (*fig.* 1328), qui constitue la première machine magnéto-électrique qui ait été imaginée. A est un fort aimant ou électro-aimant, entre les pôles très rapprochés duquel tourne un disque de cuivre. L'axe de ce disque communique, par le ressort *r*, avec une des extrémités du fil d'un réomètre, et le contour, avec l'autre extrémité du même fil, par l'intermédiaire du ressort *r'*. Les bords du disque sont amalgamés, pour rendre le contact plus intime. Pendant la rotation, l'aiguille est déviée, et le sens de la déviation reste le même, quel que soit le point de contact du ressort *r'*; mais l'intensité du courant dérivé dans le réomètre varie avec la position de ce point; elle est d'autant

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. L, p. 42.

plus grande qu'il est plus rapproché des pôles de l'aimant. Quand on change le sens de la rotation, le courant est renversé. On peut aussi faire communiquer les deux bouts du fil du réomètre avec le contour du disque. Alors le sens du courant dépend du bout qui est le plus rapproché des pôles de l'aimant. Si les deux bouts sont placés à la même distance de part et d'autre de ces pôles, l'aiguille n'est pas déviée.

Une fois admise l'existence des courants induits dans le disque, il est facile de concevoir qu'ils puissent déplacer l'aimant, s'il est mobile. On voit aussi pourquoi l'action est d'autant plus prononcée que le disque est meilleur conducteur, les courants d'induction se développant alors plus facilement (1740). Les fentes très rapprochées annulent tout effet, parce qu'elles interrompent les circuits dans lesquels les courants induits tendent à se développer. Ces courants ne peuvent se former sur les substances isolantes; cependant Arago a trouvé que les oscillations d'une aiguille aimantée étaient un peu ralenties par le voisinage de plaques de verre ou de gomme laque. Ce fait d'abord contesté, puis confirmé, se rattache à des phénomènes de *diamagnétisme* dont nous parlerons plus loin. Mais pour déterminer l'action exercée sur l'aimant, et les trois composantes découvertes par Arago, il faut analyser les courants qui circulent dans le disque, trouver le sens dans lequel ils marchent et la forme des courbes qu'ils parcourent, courbes qui sont fixes dans l'espace pendant que le disque tourne et se dérobe, pour ainsi dire, sous elle.

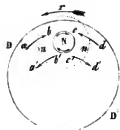


Fig. 1329.

1785 Distribution des courants à la surface du disque tournant. — MM. Nobili et Antinori [1] ont fait de nombreuses expériences sur ce sujet. Ils exploraient la surface du disque au moyen de cônes en cuivre, ou *sondes*, fixés aux extrémités du fil du réomètre, et qu'ils appuyaient en deux points du disque, en ayant soin de ne pas presser trop fort, de peur de développer des courants thermo-électriques. Voici les résultats auxquels ils sont arrivés. Soit DD' (*fig.* 1329) le disque, tournant dans le sens de la flèche *r*, N le pôle nord d'un barreau aimanté placé perpendiculairement au disque. Les sondes appliquées successivement en *a*, *b*; *a'*, *b'*, indiquent entre ces points des courants directs par rapport à ceux de l'aimant, dus à ce que la partie *ab'* du disque s'éloigne de l'aimant. En *cd* et *c'd'* on trouve, au contraire, des courants inverses provenant de ce que la partie *cd'* s'approche de l'aimant. Les courants *ab*, *a'b'* attirent l'aimant, les courants *cd*, *c'd'* le repoussent. Si donc il est mobile, il sera entraîné dans le sens du mouvement du disque. — Remarquons que les parties du courant *cd*, *c'd'* qui repoussent l'aimant, tendent à l'éloigner du disque, tandis

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XLVIII, p. 426, et t. L, p. 280.

que les courants *ab*, *a'b'* tendent à l'en rapprocher ; mais à cause du sens du mouvement, les premiers sont plus rapprochés de l'aimant et envahissent le disque jusques sous son pôle ; leur action l'emporte donc sur celle des autres, qui agissent de plus loin et plus obliquement. De là l'explication de la répulsion normale au disque, constatée par Arago. — Quant à la composante parallèle au rayon, remarquons que l'aimant est repoussé vers le centre par les courants qui règnent en *cd*, et en sens contraire par ceux qui règnent en *c'd'*. Les forces qui agissent ainsi proviennent des points du disque renfermés dans une circonférence *nn*, dont le rayon dépend des distances, et des intensités des courants développés par l'aimant. Des actions opposées sont produites par les courants *ab*, *a'b'*, mais nous venons de voir qu'elles sont plus faibles. Or, si l'aimant est assez rapproché du bord du disque pour qu'une partie de la circonférence *nn* soit en dehors, on voit que les courants tels que *c'd'* l'emporteront, et le pôle N sera repoussé vers l'extérieur ; si l'aimant se rapproche du centre, cette répulsion diminuera, deviendra nulle, puis quand le cercle *nn* sera tout entier sur le disque, les courants tels que *cd* l'emporteront, les parties du disque voisines du centre n'éprouvant qu'une faible induction, à cause de leur faible vitesse. Mais une fois que le cercle *nn* aura dépassé le centre, les mouvements du disque étant en sens contraire de part et d'autre de ce point, les effets produits par les parties de cercle *nn* qui ne sont pas du même côté du centre se contrarieront, l'aimant se rapprochera de la position verticale, et s'y arrêtera complétement quand il sera au-dessus du centre. Dans cette position, l'expérience montre qu'il ne se produit plus de courants induits, comme on pouvait le prévoir.

Les effets intenses que produisent les disques en fer doux sont dûs au magnétisme contraire développé par les pôles de l'aimant ; ce magnétisme persiste après que le point influencé a un peu dépassé l'aimant, et agit sur ce dernier par attraction. Quant à la nullité d'effets d'un disque d'acier, il est difficile de s'en rendre bien compte ; on soupçonne cependant qu'elle est due à la persistance des états magnétiques excités sous les pôles de l'aimant.

Distribution générale des courants sur le disque. — Nobili et Antinori n'avaient exploré que certaines parties des courbes parcourues sur le disque par les courants ; ils ont cependant, dans le cas de deux pôles d'aimant placés symétriquement par rapport au centre, construit deux courbes dont l'ensemble forme une espèce de 8, et que parcouraient les courants développés pendant le mouvement de rotation. Mais c'est à M. Mateucci qu'est dû le travail le plus complet sur ce sujet.[1] Pour rendre les courants plus intenses, il les excitait au moyen d'un électro-aimant puissant dont le fer doux seul pesait 100 kilog., et dont l'hélice recevait le courant de 20 couples de Grove. Les branches de cet électro-aimant étaient horizontales et placées symétrique-

[1] *Ann. de ch. et de ph.*, 3e sér., t. XXXIX, et XLIX ; et *Cours sur l'induction.* Paris (1854), page 97.

ment par rapport au centre d'un disque vertical en cuivre de $0^m,80$ de diamètre appliqué sur un autre disque en bois, centré sur un arbre mu par une roue et une corde sans fin. La *fig.* 1330 représente un autre appareil employé par le même physicien; le disque *d* reçoit son mouvement, d'une roue à manivelle *m* et d'une corde sans fin. *e*, *e* sont les branches de l'électro-aimant, pouvant s'écarter plus ou moins, et *r*, *r* des *sondes* en cuivre, pressées modérément sur le disque, par des ressorts à boudin logés dans les tubes qui les portent. Ces sondes son soutenues et articulées de manière à pouvoir être appuyées sur les points du disque que l'on veut explorer; elles communiquent avec le réomètre R, et sont arrêtées dans une position fixe par les vis *v*, *v*, *u*, *u*.

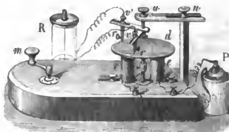


Fig. 1330.

La *fig.* 1331 représente les résultats obtenus dans ces expériences, N et S sont les pôles nord et sud de l'électro-aimant. Les courants parcourent, dans le sens des flèches, les courbes tracées en points. On voit qu'il y a quatre systèmes de circuits fermés, disposés deux à deux symétriquement par rapport à la ligne des pôles, à laquelle ils sont tangents. Les courbes 1, 2, 3, 4 et 5 sont des lignes neutres ou de *nul courant*; elles sont normales à la ligne des pôles et au contour du disque. Les courants ont leur maximum d'intensité dans les points où ils coupent normalement ces lignes. La ligne *neutre* A B établit la séparation entre des états électriques opposés. Il en est de même de la circonférence *nn*, qui passe par les projections des pôles des électro-aimants, et qui est aussi une ligne *neutre*. Quand on fait tourner le disque avec une vitesse suffisante, la ligne neutre A B se déplace proportionnellement à la vitesse, dans le sens du mouvement, et vient en A'B'; il en est de même de tout le système des autres lignes neutres et des courbes que parcourt l'électricité. En même temps, la circonférence neutre *nn* se resserre. Cette influence de la vitesse prouve qu'il faut, pour le développement de l'induction, un temps comparable à la durée d'un tour du disque.

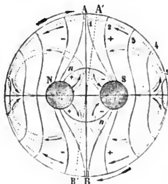


Fig. 1331.

M. Matteucci, ayant formé avec des fils de cuivre garnis de soie et fixés sur

un plateau de cire, des circuits semblables à ceux qui sont figurés sur le disque tournant, et les ayant fait parcourir par des courants voltaïques, a pu reproduire, sur une aiguille aimantée, tous les effets des trois composantes trouvées par Arago (1781).

1786. Induction par mouvement, dans des masses métalliques de forme quelconque. — Si l'on suspend entre les pôles d'un puissant électro-aimant, par un cordon fortement tordu, un cube en cuivre, en argent...., ce cube se met à tourner avec une vitesse croissante. Si alors on lance dans l'électro-aimant, le courant de 25 à 30 couples, on voit le cube tournant s'arrêter subitement, pour recommencer à tourner sous l'influence de la force de torsion dés qu'on supprime le courant. La *fig.* 1332 représente un appareil construit par M. Ruhmkorff, avec lequel on fait facilement cette expérience.

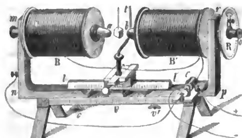


Fig. 1332.

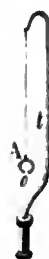


Fig. 1333.

B, B' sont deux bobines enveloppant deux gros cylindres en fer doux, de maniére que les pôles *a* et *b* soient de nom contraire. Les cylindres sont réunis par des barreaux coudés de même métal *mn*, *pr*, pouvant être fixés sur une barre de fer F, et à différentes distances l'un de l'autre, au moyen de vis *v*, *v'*, de manière à constituer un seul électro-aimant. Avant de circuler dans les bobines, le courant passe par un commutateur *c*. Une régle graduée *l l'* porte un curseur qui soutient une tige *t*, à laquelle est suspendu le cube tournant,

Le phénoméne qui nous occupe a été découvert par M. Faraday ; il s'explique par les courants d'induction qui se développent dans le cube en mouvement, à l'instant où le courant est lancé dans l'électro-aimant, et sur lesquels ce dernier agit avec assez d'énergie pour détruire subitement la vitesse. Quand ensuite le cube, sollicité par la torsion du fil, tend à se mouvoir, le moindre déplacement qu'il éprouve suffit pour y développer des courants induits, à cause de l'énorme force magnétique qui s'exerce sur lui, et il est sans cesse ramené au repos. — Cette explication est confirmée par l'expérience suivante de M. E. Becquerel : ayant remplacé le cube par un anneau de cuivre A (*fig.* 1333), ouvert en *o* et suspendu verticalement, il vit le mouvement continuer aprés que le courant eut été lancé dans l'électro-aimant ; c'est que les courants

d'induction ne pouvaient se développer dans l'anneau brisé. Cet anneau ayant été fermé au moyen d'un fil métallique, la vitesse put être subitement anéantie, comme dans le cube de cuivre. On remarque, en outre, que les métaux les meilleurs conducteurs sont ceux qui produisent le phénomène de la manière la plus nette. — M. Lamy a remarqué que, si l'on fait mouvoir le commutateur de manière à renverser fréquemment le courant, ou seulement à l'interrompre et à le rétablir, la masse, quelle que soit sa forme, tourne de plus en plus rapidement, pourvu qu'elle ne soit pas dans le plan vertical qui contient la ligne des pôles.

Masses composées de lames. — M. Matteucci a fait un grand nombre d'expériences qui montrent bien aussi qu'il est nécessaire qu'il puisse se développer des courants d'induction dans la masse mobile, pour que l'électro-aimant agisse sur elle [1]. Cette masse était suspendue entre les pôles d'un électro-aimant en fer à cheval, recevant d'un système d'horlogerie un mouvement de rotation autour d'un axe vertical passant entre ses deux branches. La masse se mettait à tourner dans le sens de l'électro-aimant, sous l'influence d'une force qui était mesurée, soit par la torsion d'un fil d'argent servant à la suspendre, soit par le nombre de tours faits pendant un temps donné, avec une vitesse constante, par ce corps suspendu alors par un fil de cocon. M. Matteucci a reconnu ainsi qu'un cube formé de lames de cuivre très minces séparées par des couches de vernis, ne prend pas de mouvement, quand il est suspendu de manière que les lames soient horizontales ; tandis que le même cube tourne vivement, quand ces lames sont verticales. C'est que, dans le second cas, chaque lame peut être parcourue par des courants induits dans un plan normal à la ligne des pôles ; ce qui ne peut avoir lieu dans le premier.

M. Matteucci ayant formé, avec du bismuth cristallisé, de petits cubes égaux dont deux faces étaient parallèles au plan de clivage le plus brillant, plan qui est perpendiculaire à l'axe principal de cristallisation, reconnut que l'action de l'électro-aimant est plus vive quand ces faces sont verticales, que lorsqu'elles sont horizontales. Un cube en bismuth, dont la cristallisation est confuse et la cassure granulée, est toujours sollicité plus vivement par l'électro-aimant, que le bismuth cristallisé. Les couches de bismuth se comportent donc comme les lames de cuivre de l'expérience précédente ; cependant, elles ne sont pas séparées par des substances isolantes ; mais il suffit que la conductibilité soit moindre perpendiculairement aux plans de clivage, que dans le sens de ces plans, pour qu'on puisse rapprocher les deux phénomènes. Or, c'est ce que M. Matteucci a vérifié directement : il laissa refroidir lentement dans une large assiette, une couche de bismuth de 20 à 25^{mm} d'épaisseur, dans laquelle il tailla deux tiges de même longueur et de même section, l'une parallèle, l'autre perpendiculaire aux plans du clivage principal ; et il trouva, par la méthode du réomètre différentiel, que les tiges perpendiculaires aux

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXIX, p. 134, et XLIII, p. 467.

plans de clivage conduisent moins bien que les autres. M. Matteucci a confirmé ce résultat, en montrant que les tiges perpendiculaires aux clivages, s'échauffent plus que les autres, par le passage d'un même courant voltaïque.

1787. Réaction des courants induits, sur l'aimant qui les développe. — En même temps que les aimants produisent dans les corps conducteurs, des courants induits, ceux-ci réagissent sur les aimants, et modifient leur état magnétique. MM. Breguet, Weber, Faraday, Matteucci, Verdet, ont étudié ce genre de phénomène. M. Verdet se servait de l'appareil de Page (*fig.* 1730), dans lequel un barreau de fer tourne devant les pôles d'un aimant enveloppé par l'hélice induite ; seulement, il remplace le barreau de fer par des lames des différentes substances à essayer, et il ajoute à l'appareil, un commutateur qui ne laisse circuler le courant induit que pendant $\frac{1}{12}$ du temps d'une révolution de la lame, et à partir d'une position donnée de cette lame. L'existence de courants induits dans l'hélice montrent que les courants qui sont induits dans le barreau par l'aimant, réagissent sur le magnétisme de ce dernier. La réaction n'a plus lieu quand on remplace la lame par un faisceau de fils métalliques, ou par un barreau formé de limaille agglutinée par un mastic.

D'après les lois de l'induction, les courants observés devraient être distribués symétriquement, pendant la période où la plaque s'éloigne de la ligne des pôles de l'aimant, et pendant celle où elle s'en rapproche ; or, l'expérience indique entre ces deux périodes une dissymétrie d'autant plus marquée, que la vitesse de rotation est plus grande. Ce phénomène est dû au temps nécessaire pour que l'induction s'accomplisse dans la lame tournante. Des expériences faites en remplaçant l'aimant de l'appareil par un puissant solénoïde, ont manifesté la même dissymétrie ; ce qui prouve qu'elle n'est pas due à l'influence du temps sur les variations du magnétisme de l'aimant.

1788. Chaleur produite par l'induction. — Nous avons exposé, en traitant des sources de chaleur, la nouvelle théorie mécanique de la chaleur (II,1075). Dans l'induction par les aimants, il faut dépenser un certain travail mécanique destiné à vaincre les résistances produites par les réactions électro-magnétiques qui tendent à détruire la vitessse des parties mobiles de l'appareil. Ce travail, tout-à-fait distinct de celui qui est employé à vaincre les frottements et autres résistances passives, doit être, d'après les idées nouvelles, représenté par un certain développement de chaleur. C'est, en effet, ce qui a été constaté par M. Joule et par M. L. Foucault[2]. M. Joule opère de la manière suivante : un petit électro-aimant de 12^{cm} de longueur est renfermé dans un tube de verre rempli d'eau. Ce tube est fixé sur un arbre vertical, portant un commutateur auquel aboutissent les extrémités de l'hélice magnétisante, dont le circuit est fermé au moyen d'un réomètre. Le système fait 10

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXI, p. 187.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXIV, p. 504 ; et t. XLV, 316.

tours par seconde, sous l'influence d'un poids qui descend le long d'une échelle verticale ; de manière qu'il est facile d'évaluer le travail mécanique dépensé au bout d'un temps donné. Le tube de verre tourne ainsi entre les pôles d'un fort électro-aimant, et l'eau s'échauffe d'une quantité proportionnelle à l'intensité du courant induit, mesurée par le réomètre. La chaleur perdue par le contact de l'air, s'évalue en faisant tourner l'appareil après avoir supprimé le courant dans l'électro-aimant. On calcule ensuite, par les formules des chaleurs spécifiques, le nombre de calories développées dans le tube en mouvement. M. Joule a trouvé ainsi, pour le nombre de kilogrammètres équivalant à une calorie, des résultats variant de 322 à 572, et dont la moyenne est de 460^{km} ; nombre qui ne diffère pas trop, vu les incertitudes du mode d'expérience, de ceux qui ont été obtenus en partant du frottement ou de l'expansion de la vapeur (II, 1076).

M. L. Foucault fait tourner entre les pôles d'un fort électro-aimant, un disque en cuivre, au moyen du système d'engrenage qui lui sert à mettre en mouvement son gyroscope (I, 126). Des armatures en fer doux, appliquées aux extrémités des branches de l'électro-aimant, concentrent l'action des pôles tout près du corps tournant ; et celui-ci, lancé avec une vitesse de 150 à 500 tours par seconde, s'arrête au bout de quelques secondes après qu'on a introduit le courant de 6 couples à charbon dans l'hélice magnétisante. Si l'on agit sur la manivelle de manière à entretenir une vitesse de 75 tours, on éprouve une grande résistance, qui n'existe pas quand l'électro-aimant n'est pas en activité. En même temps, le disque s'échauffe et devient brûlant au bout de peu de temps, malgré la perte considérable de chaleur qui se fait par le contact de l'air. Dans une expérience, le disque s'est échauffé de 60° en 2 minutes, l'électro-aimant n'étant animé que par 2 couples à charbon. Il est évident que de forts aimants peuvent remplacer l'électro-aimant.

1789. Magnétisme en mouvement par l'influence du globe. — La terre se comportant comme un aimant, un disque tournant devra être parcouru par des courants induits sous l'influence du globe. C'est, en effet, ce que M. Faraday a constaté : quand on fait tourner sur lui-même un disque de cuivre dirigé perpendiculairement à l'aiguille d'inclinaison, et qu'on appuie les extrémités du fil d'un réomètre, sur l'axe de rotation et sur le contour, on dérive un courant, dont le sens change avec celui de la rotation. Ce courant s'affaiblit quand le plan du disque se rapproche de la direction de l'aiguille d'inclinaison, et il devient nul quand ce plan est parallèle à cette aiguille. Une sphère en cuivre, tournant autour d'un axe situé dans le méridien magnétique et formant un angle avec l'aiguille d'inclinaison, est parcourue par des courants assez intenses pour dévier directement une petite aiguille aimantée rendue astatique, et placée dans un plan horizontal passant par le centre de la sphère. Si la rotation se fait en sens contraire du mouvement de la terre, et que l'aiguille soit placée à l'est de la sphère de cuivre, le pôle nord est dévié à l'est. Le contraire a lieu quand l'aiguille est à l'ouest. Si l'on change le sens de la rotation, les déviations, pour les mêmes positions, ont lieu en sens contraire. Les courants

d'induction développés dans une sphère qui tourne, exercent une grande influence sur les phénomènes observés par M. Barlow sur un globe de fer (1782).

Il résulte de ces faits une conséquence curieuse ; c'est que tout corps conducteur en mouvement doit être parcouru par des courants d'induction, sauf dans les positions particulières que nous venons de signaler. Il doit en être ainsi des rouages métalliques des machines, des roues des wagons, des pièces des machines à vapeur, et peut-être même du corps des animaux pendant qu'ils se meuvent, si toutefois la conductibilité des tissus n'est pas trop faible pour se prêter au développement de ces sortes de courants.

1790. Explication des courants terrestres, par le magnétisme de rotation. — Les courants terrestres, dont l'existence a été déduite par Ampère des actions magnétiques et électro-dynamiques qu'exerce le globe, sont liés, comme nous l'avons vu, en ce qui concerne leurs variations, aux changements de position du soleil (1740). Cette observation a conduit à chercher l'origine de ces courants dans une induction continuellement produite dans le globe en mouvement, par l'influence du soleil considéré comme un immense corps magnétique, ou, ce qui revient au même, comme un corps entouré d'une ceinture de courants, comme la terre. L'idée de considérer les corps célestes comme magnétiques est fort ancienne, et l'on avait même cherché à expliquer les variations de l'aiguille aimantée par l'action magnétique du soleil agissant différemment aux diverses heures du jour. Le P. Secchi a particuliérement développé l'hypothèse qui attribue les courants terrestres à une induction magnétique produite par le soleil. Après avoir analysé avec soin les variations de l'aiguille, comparées aux changements diurnes et annuels de position du soleil, il a conclu que le soleil se comporte comme un aimant ayant ses pôles magnétiques tournés comme ceux de la terre. Les relations remarquées entre les années à grandes ou faibles perturbations, coïncidant avec celles où les taches solaires ont été nombreuses ou rares (1258) ont été invoquées en faveur de cette hypothése. Néanmoins, cette manière ingénieuse d'expliquer les courants terrestres ne nous paraît pas, dans l'état actuel de la science, préférable à quelques-unes des autres hypothéses que nous avons eu l'occasion de faire connaître (1710).

§ 5. — UNIVERSALITÉ DU MAGNÉTISME. — MAGNÉTISME SPÉCIFIQUE.

1. Universalité du magnetisme. — Diamagnétisme.

1791. De l'universalité du magnétisme. — Pendant longtemps on a considéré le magnétisme comme appartenant en propre à un petit nombre de substances, à la tête desquelles se trouve le fer. Mais depuis qu'on a été conduit à attribuer, avec Ampère, les phénoménes du magnétisme à des courants élec-

triques moléculaires, l'esprit avait quelque peine à admettre que ces courants n'existent que dans quelques substances privilégiées. Or, nous allons voir que tous les corps obéissent à l'action des aimants ; mais ce n'est qu'après la découverte des électro-aimants, qu'on a pu disposer de moyens assez puissants pour lever tous les doutes à cet égard. La question de l'universalité du magnétisme avait été soulevée dès le commencement du XVIIIe siécle. Musschenbroeck et Nollet avaient constaté qu'une foule de corps en poudre, les cendres des végétaux, de petits fragments de substances organiques, sont attirables à l'aimant ; mais ils attribuérent ces résultats à des parcelles de fer contenues dans ces corps. Lehmann et Cavallo se sont livrés à des recherches sur ce sujet ; et Brugmanns, en 1778, découvrit un phénomène tout à fait inattendu, la *répulsion* du bismuth par les aimants très énergiques, fait capital qui n'attira pas alors toute l'attention qu'il méritait. Coulomb a, plus tard, constaté que de petites aiguilles de différents métaux, parmi lesquels l'or et l'argent, de fines tiges de verre, de substances végétales ou animales, suspendues sous une cloche à un fil de cocon, oscillent entre les pôles contraires de deux forts aimants[1] ; mais il reconnut aussi, qu'il suffit de mêler à de la cire, $\frac{1}{133120}$ de fer en poudre fine, pour lui donner la propriété de se diriger entre les mêmes pôles. Or, l'analyse la plus exacte ne pouvant déceler d'aussi faibles quantités de fer, on était en droit de soupçonner la présence de ce métal dans les substances essayées. Il résulte d'une expérience de M. Biot[2], que les forces magnétiques sont proportionnelles aux quantités de fer ; car, ayant fait osciller des faisceaux égaux de lames de divers micas, entre les pôles contraires de deux aimants puissants, il trouva que les forces magnétiques étaient entre elles comme 144 et 49, et l'analyse faite par Vauquelin, décela la présence de quantités d'oxyde de fer précisément dans ce même rapport.

Aprés la découverte de l'électro-magnétisme, M. Becquerel a étudié l'action d'un courant énergique sur de petites baguettes de différentes substances[3], et il a constaté ce résultat nouveau : tandis qu'un fil de fer horizontal suspendu par un fil de cocon dans un multiplicateur, se place transversalement au plan du cadre, des tiges de certaines substances, comme la gomme laque, le bois..., se placent, dans certaines circonstances, dans le plan même de ce cadre. Un tube en papier, rempli de peroxyde de fer, présente ce résultat d'une maniére nette ; et M. Becquerel a reconnu, au moyen d'un aimant, que les pôles magnétiques se trouvent placés sur deux arêtes opposées du petit cylindre, au lieu d'être rejetés à ses extrémités. Une semblable distribution du magnétisme a été aussi reconnue en remplaçant le multiplicateur par des aimants.

M. Lebaillif, en 1828, trouva que tous les corps sont influencés par les aimants. Mais le nom de *sidéroscope*, donné à l'appareil trés délicat qu'il

[1] *Journal de physique*, t. LIV (1802), p. 367.

[2] *Mém. de l'Ac. des sc.* de Paris, 1816 ; et *Précis élém. de phys.*, t. II, p. 80.

[3] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXV, p. 269 ; et XXXVI, p. 337.

employait, porte à penser que ces résultats étaient attribués en général à la présence do parcelles de fer dans les substances essayées. Le sidéroscope se compose d'une paille de 40^{cm} de longueur suspendue horizontalement par un fil de cocon, dans une cage en verre analogue à celle de la balance de torsion; à l'extrémité de la paille et sur son prolongement, est fixée une aiguille à coudre aimantée à saturation, dont on approcho le corps à essayer. M. Lebaillif a constaté que le bismuth et l'antimoine exercent une répulsion sur l'aiguille, confirmant ainsi la remarque importante de Brugmanns. Depuis, Saigey a trouvé la même répulsion avec diverses autres substances.

Les recherches que nous venons de mentionner n'avaient pu faire adopter l'idée que le magnétisme agit sur tous les corps; les résultats étaient isolés, peu concordants, et généralement attribués, sauf dans le cas de la répulsion, à la présence du fer; lorsque M. Faraday fit, en 1845, sa célébre découverte de l'action qu'exercent la plupart des corps transparents sur la *lumière polarisée*, quand ils sont soumis à l'influence de puissants aimants. Ce phénomène, que nous étudierons dans l'optique, le conduisit à penser que les aimants agissent sur les molécules des corps transparents, et il se livra à des recherches suivies sur ce sujet. Une foule de physiciens s'élancérent avec ardeur dans la nouvelle voie qui venait d'être ouverte, et il est bien prouvé aujourd'hui que la plupart des corps sont sensibles à l'action du magnétisme. Mais il faut, pour établir ce fait général, se servir d'électro-aimants trés puissants; car les aimants n'exercent sur les corps non magnétiques qu'une action environ 100,000 fois plus faible que celle qu'ils exercent sur le fer.

1792. Diamagnétisme. — L'appareil dont s'est servi M. Faraday[1] consiste en un électro-aimant en fer à cheval placé verticalement. Aux extrémités des branches, sont appliqués des prismes en fer doux, nommés *pièces polaires*, destinés à rapprocher à volonté les centres d'attraction magnétique. Un petit étrier en papier suspendu à un fil sans torsion, soutient une tige de la substance à essayer. Cette partie de l'appareil est préservée des agitations de l'air par une cage vitrée. On s'assure d'abord que l'étrier et son fil de suspension ne sont pas influencés par l'électro-aimant. Les premiéres expériences ont été faites sur le *verre pesant* (silicoborate de plomb); une tige de cette substance, au lieu de se placer suivant la ligne des pôles de l'aimant, ce que M. Faraday appelle prendre la direction *axiale*, se place perpendiculairement à cette ligne, ou prend la direction *équatoriale*. Beaucoup d'autres substances, parmi lesquelles se distingue le *bismuth*, présentent le même phénoméne. D'autres au contraire, prennent la direction axiale, comme les corps magnétiques proprement dits. L'appareil de M. Ruhmkorff (*fig.* 1332) convient très bien pour répéter ces expériences. On peut aussi remplacer l'électro-aimant par un aimant trés puissant, mais les résultats sont bien moins prononcés.

M. Faraday appelle corps *diamagnétiques*, ceux qui se dirigent perpendicu-

[1] *Bibliothèque universelle de Genève* (Arch. des sc.), t. II, p. 42 et 145.

lairement à la ligne des pôles de l'aimant, et il nomme *paramagnétiques*, ou simplement *magnétiques*, ceux qui, comme le fer, prennent la direction axiale. Les corps diamagnétiques prennent la direction *équatoriale*, parce qu'ils sont repoussés par l'électro-aimant. La répulsion s'exerce également par les deux pôles, comme on peut le vérifier en approchant d'un des pôles de l'électro-aimant, un morceau de bismuth suspendu à un fil : on voit ce corps s'écarter du pôle dés qu'on fait passer le courant dans l'hélice, et s'en rapprocher, en obéissant à la pesanteur, dés qu'on supprime le courant. — M. Faraday a encore mis la répulsion en évidence, au moyen du spectre magnétique : de la limaille fine de bismuth projetée sur une feuille de papier tendue au-dessus des pôles de l'électro-aimant, dessine les bords du fer doux en laissant une bande étroite complétement dégarnie, pendant qu'elle se répand de part et d'autre de cette bande. M. Pouillet ayant fait l'expérience avec un mélange de poudres de bismuth et de sesquichlorure de chrôme qui est magnétique, a vu les poudres se séparer : l'espace abandonné par le bismuth était rempli par la poudre violette du sesquichlorure, qui dessinait ainsi le contour du fer doux.

1793. Des divers solides magnétiques ou diamagnétiques. — Il résulte des observations de M. Faraday, qu'il y a beaucoup plus de corps diamagnétiques que de corps magnétiques. Parmi les premiers, nous citerons le *bismuth*, *le plomb*, *le zinc*, *le cuivre*, *le cristal de roche*, *le verre*, *le sel marin*, *le plâtre*, *le charbon*, *le soufre* ; en général, les substances organiques, *la résine*, *le sucre*, *le bois*, *la chair crue ou cuite*, *le sang*, etc., etc. Les substances *magnétiques* sont principalement des métaux et la plupart de leurs composés salins, soit secs, soit en dissolution ; nous verrons plus loin comment on procède dans le cas des dissolutions. Ainsi, les dissolutions des sels de fer sont magnétiques. Cependant les *cyanoferrures* secs, jaunes ou rouges, de potassium sont diamagnétiques. Le sang, la chair des animaux, quoique renfermant du fer, sont diamagnétiques, ce qui montre que l'influence des éléments diamagnétiques l'emporte sur celle de la petite quantité de fer contenue. Aussi, le corps d'un animal même vivant, se place-t-il dans la direction équatoriale ; c'est, du moins, ce que l'expérience a prouvé pour le corps d'une grenouille vivante. M. Plucker a reconnu que certaines substances organiques ne sont pas diamagnétiques, comme on le croyait avant lui : ainsi, on peut dire que les écorces des végétaux, sont en général magnétiques, tandis que les parties intérieures sont diamagnétiques. Les élytres des insectes coléoptères sont anssi magnétiques. M. Faraday n'a pas rencontré de corps solide ou liquide complétement indifférent à l'action du magnétisme. On peut cependant former des mélanges qui soient dans ce cas, en réunissant en proportions convenables une snbstance diamagnétique avec une substance paramagnétique. Par exemple, l'eau étant, comme nous le verrons, diamagnétique, une dissolution de sulfate de fer peut être étendue de manière à devenir tout-à-fait indifférente.

Circonstances qui modifient les résultats. — Il y a des précautions à prendre pour n'être pas induit en erreur dans les expériences destinées à recon-

naître si un corps est diamagnétique. La plus petite quantité de fer peut rendre magnétique une substance qui ne l'est pas naturellement. Par exemple, du bois peut paraître magnétique quand il a été taillé avec un couteau. Le papier paraît souvent magnétique, quoique les substances organiques soient diamagnétiques; cela tient probablement à la présence de particules de fer, mêlées à la pâte pendant la fabrication.

Il faut aussi avoir égard à la forme des extrémités polaires de l'électro-aimant, et à la position du petit barreau mobile par rapport à ces extrémités. M. H. C. Œrsted a fait un grand nombre d'expériences à ce sujet[1]. Il a reconnu qu'une aiguille de substance diamagnétique, qui prend la direction équatoriale quand elle se trouve entre les faces polaires verticales des armatures de l'électro-aimant, prend la direction axiale quand elle est suffisamment élevée au-dessus de ces faces, et cet effet est d'autant plus marqué qu'elles sont plus rapprochées. Lorsqu'on suspend l'aiguille au-dessus du bord supérieur d'une des faces polaires seulement, l'aiguille diamagnétique prend encore la direction axiale ; mais si on l'approche des autres bords des pièces polaires, elle se place perpendiculairement au bord à l'influence duquel on l'expose. Cela a lieu, notamment, quand les pièces polaires sont forées suivant l'axe ; une aiguille de bismuth prend alors une direction axiale quand elle est suspendue entre les deux ouvertures. M. Becquerel avait vu, au contraire, le peroxyde de fer, qui est magnétique, se placer dans la direction équatoriale (1791), et l'on avait voulu conclure de là que le diamagnétisme n'existait pas, et que les effets qu'on lui attribue étaient dus à une distribution transversale du magnétisme, dépendant de la forme du corps attiré et de celle des faces polaires. Mais M. Faraday a montré que l'équilibre, dans le cas du peroxyde de fer, est instable, et qu'il se forme plusieurs pôles dans différentes directions, à cause de l'état de division de cette substance. Au reste, la poudre de peroxyde de fer se montre paramagnétique quand on en forme une masse non allongée, car cette masse est alors attirée par les pôles des aimants. Les positions axiales ou équatoriales attestent donc, en général, les attractions ou répulsions ; mais une même substance peut passer d'une position à l'autre, par diverses causes mal connues, mais qui dépendent évidemment de la longueur et de la position des aiguilles, de la forme du champ magnétique que forment les pièces polaires, et de la manière dont les forces attractives ou répulsives y sont distribuées · circonstances qui ont une grande influence sur la direction de la résultante.

C'est à une cause semblable qu'il faut attribuer les résultats trouvés par M. Plucker, qui a vu un petit barreau diamagnétique prendre la direction axiale quand il l'élevait suffisamment au-dessus des pôles de l'électro-aimant ; et, quand ce barreau était assez peu élevé pour conserver la direction équatoriale, se diriger suivant l'axe si l'on ajoutait un couple de plus aux deux qui chargeaient d'abord l'électro-aimant. Ayant observé ces résultats sur des corps

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXIV, p. 424.

composés de substances magnétiques et de substances diamagnétiques, M. Plucker en avait conclu que la répulsion diminuait plus rapidement que l'attraction, quand on augmentait la distance ou qu'on diminuait l'intensité du courant. Des expériences faites avec un petit barreau formé d'un mélange de bismuth et d'étain rendu magnétique par du fer, lui ont, en effet, donné les mêmes résultats. Mais nous verrons que les lois sont les mêmes pour le diamagnétisme et le paramagnétisme ; il faut donc voir aussi, dans ces anomalies, une question de direction de résultante.

1794. Diamagnétisme et magnétisme des liquides. — Pour reconnaître si un liquide est magnétique ou diamagnétique, M. Faraday le renferme dans un petit tube en verre très mince, qu'il suspend horizontalement entre les pôles de son électro-aimant. Une expérience préalable montre que le tube de verre vide n'est pas sensiblement influencé. M. Faraday a vu ainsi le tube prendre la direction équatoriale, avec une foule de liquides, qui, par conséquent, sont *diamagnétiques*. Tels sont *l'acide azotique*, *l'eau*, *l'alcool*, *l'éther*, *l'acide sulfurique*, *les solutions des sels alcalins et terreux*, *l'huile d'olive*, *l'essence de térébenthine*, *le mercure*, etc., etc. Les liquides *paramagnétiques* sont principalement les dissolutions des sels des métaux magnétiques. La dissolution de cyanoferrure rouge de potassium est *magnétique*, tandis que le sel sec est *diamagnétique* (1793).

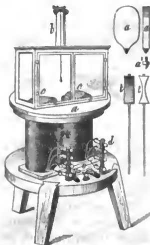


Fig. 1334.

M. Matteucci dispose entre les pièces polaires de l'électro-aimant une petite caisse en verre, contenant une goutte d'huile en suspension dans une dissolution alcoolique de chlorure de fer de même densité ; on voit cette goutte s'allonger dans le sens transversal. Si la goutte est formée de la dissolution de chlorure, en suspension dans l'huile, elle s'allonge dans le sens de l'axe. M. Matteucci a encore mis en suspension dans la dissolution de chlorure de fer une multitude de gouttelettes d'huile, et les a vues se porter sur la ligne équatoriale, pendant que le liquide ferrugineux s'accumulait autour des pôles.

M. Plucker distingue les liquides magnétiques, des diamagnétiques, par les changements de forme qu'ils éprouvent sous l'influence d'un électro-aimant[1]. L'appareil qu'il a employé dans ces expériences, et qui lui a servi dans beaucoup d'autres recherches que nous ferons connaître, consiste en un électro-aimant

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXIX, p. 129.

trés puissant en fer à cheval (*fig.* 1334), dont les pôles sont en *c*, *c*; des pièces polaires de différentes formes, telles que *a*, *a*, peuvent être appliquées sur ces extrémités ; elles sont munies de cônes *n'*, qui peuvent s'y visser, et dont les formes varient, suivant les expériences que l'on veut faire. L'hélice magnétisante est composée de quatre fils aboutissant à deux colonnes séparées, dont une est marquée *d*. On peut faire passer le courant, soit dans les quatre fils réunis bout à bout, de manière à former un circuit de longueur égale à leur somme, soit dans ces fils réunis en faisceau par leurs extrémités, de manière à former un circuit de section quadruple. Une caisse vitrée recouvre les pôles *c*, *c*; elle porte un tube de verre *b* à micromètre, dans lequel est suspendu un fil de métal, de manière à constituer une balance de torsion. Une balance ordinaire toute en verre, excepté le couteau, peut aussi être fixée dans la caisse ; elle sert à mesnrer la répulsion exercée par les pôles de l'électro-aimant sur les corps diamagnétiques.

Pour essayer les différents liquides, M. Plucker applique sur son électro-aimant les piéces polaires *a*, *a*, de manière que les parties circulaires soient en regard, et il pose sur les bords arrondis, un verre de montre contenant le liquide à éprouver. Quand ce liquide est *magnétique*, on le voit se porter vers les arêtes des piéces polaires, où la force est surtout concentrée, et s'allonger dans la direction axiale en se creusant au milieu, comme on le voit à droite (*fig.* 1835). Le protochlorure de fer présente ces résultats d'une manière remarquable. Quand le liquide est *diamagnétique*, il est repoussé par les arêtes des piéces polaires, et forme une petite colline transversale, comme on le voit à gauche ; seulement, le phénoméne est généralement moins prononcé qu'avec les substances magnétiques. Quand la surface du liquide est à peine déformée, on juge de sa courbure par l'image d'un objet éloigné. M. Plucker a constaté facilement, par ce moyen, le diamagnétisme de l'eau, de l'alcool, du sang..., et même du mercure. Il faut avoir soin, pour ce dernier liquide, de le placer dans une capsule amalgamée, pour qu'il puisse la mouiller. On obtient des résultats variés, avec chaque liquide, en le plaçant dans un vase qu'il ne mouille pas, en l'étendant sur une lame de mica remplaçant le verre de montre, ou enfin en le déposant en grosses gouttes sur les pièces polaires mêmes, que l'on peut aussi rapprocher plus ou moins. M. Matteucci a vu, de son côté, le liquide placé dans un vase à fond plat, se porter vers la ligne des pôles, ou s'en rapprocher, suivant les cas ; et M. Quet a fait mouvoir des gouttes liquides engagées dans des tubes capillaires placés entre les pôles d'un électro-aimant.


Fig. 1335.

1795. Diamagnétisme des flammes. — Les premières tentatives de M. Faraday, pour découvrir si les gaz sont sensibles au magnétisme, n'avaient pas été couronnées de succès ; mais il reconnut, plus tard, que certains gaz sont magnétiques, et d'autres diamagnétiques. Il fut conduit à reprendre ses

recherches sur ce sujet, par la découverte curieuse du P. Bancalari, qui a vu les pôles d'un électro-aimant agir par répulsion sur la flamme et la fumée d'une lampe, ainsi que sur les vapeurs d'eau et d'alcool ; résultats confirmés par M. Zantedeschi, qui a remarqué, en outre, que la flamme repoussée est déprimée. Plus tard, M. Plucker a décrit les formes singulières qu'affectent dans les divers cas des flammes de différente nature. Pour répéter ces expériences, on termine par des cônes à sommet arrondi, les pièces polaires *a*, *a* (*fig.* 1334), ou les extrémités du fer doux de l'électro-aimant BB' (*fig.* 1332), et on laisse la flamme s'élever entre les deux cônes. Dès que le courant passe, on la voit se porter latéralement d'un côté ou de l'autre, en s'aplatissant transversalement à la ligne des pôles, A (*fig.* 1336). Si cette ligne rencontre l'axe de figure de la flamme, celle-ci s'aplatit dans la direction équatoriale en s'étendant également des deux côtés, et prenant différentes formes, suivant que la ligne des pôles est plus ou moins rapprochée de son extrémité supérieure.

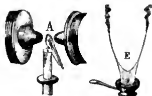


Fig. 1336.

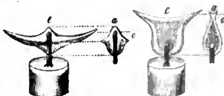


Fig. 1337.

On voit (*fig.* 1337) les formes que prend la flamme d'une chandelle de suif, quand la ligne des pôles se trouve à la hauteur *o*, *o*. On voit en *e*, *e* la flamme étendue dans le sens équatorial, et en *a*, *a* sa section par un plan passant par la ligne des pôles. On voit aussi en E (*fig.* 1336) la forme que prend la flamme de l'essence de térébenthine, ou celle d'une chandelle de suif très fuligineuse ; elle se continue à sa partie supérieure en une fumée épaisse formant deux branches séparées. M. Matteucci ayant expérimenté sur les flammes de résine, de soufre, de cire, d'alcool, d'hydrogène, a trouvé que l'action du magnétisme est la plus prononcée sur la flamme de la résine, et la plus faible sur celle de l'hydrogène ; ce qui le conduit à attribuer l'effet produit, au moins en partie, à l'action exercée sur les particules solides qui entrent dans la composition de la flamme (II,1056).

Nous avons vu comment l'arc voltaïque est violemment repoussé par les électro-aimants (1235) ; mais ici la flamme est formée par l'électricité, et le phénomène se rattache à l'action des aimants sur les courants.

1796. Gaz. — M. Faraday a étudié le diamagnétisme et le magnétisme des gaz par différents procédés [1]. Il a d'abord reconnu que l'air chaud est repoussé par les pôles d'un électro-aimant, en faisant monter ce gaz entre ces

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXIV, p. 240.

pôles, et cherchant, au moyen d'un petit thermomètre, la direction que suit la colonne gazeuse quand l'électro-aimant est inerte, puis quand il est aimanté. M. Plucker a observé la direction de la colonne d'air chaud, au moyen de l'ombre qu'elle projette. Pour les gaz froids, M. Faraday les faisait descendre ou monter entre les pôles, suivant qu'ils étaient plus denses ou moins denses que l'air, et observait le changement de direction du courant gazeux pendant l'aimantation, en cherchant à recevoir dans un tube renfermant du papier imbibé d'ammoniaque, le gaz qui avait passé sur du papier imbibé d'acide chlorhydrique. Des fumées blanches épaisses se dégageaient dans le tube quand il se trouvait sur le chemin de la colonne gazeuze. Le même physicien a encore procédé en soufflant au bout d'un tube et avec différents gaz, des bulles de savon qu'il approchait des pôles de l'électro-aimant, ces bulles se portaient vers le pôle magnétique, ou s'en éloignaient suivant les cas. Il a encore rempli de gaz une ampoule de verre très mince fixée à l'extrémité d'un long levier en bois suspendu horizontalement par un fil sans torsion ; l'ampoule était attirée ou repoussée, suivant le gaz qu'elle contenait. Des expériences, faites avec l'ampoule remplie d'air, avaient prouvé que le verre n'était pas sensiblement influencé.

M. Faraday a reconnu que, *dans l'air, l'oxygène* est fortement attiré par les pôles magnétiques, et que tous les autres gaz sont repoussés, surtout l'hydrogène et le gaz d'éclairage. L'oxyde de carbone, le bioxyde d'azote et le gaz nitreux, n'ont cependant donné que des résultats douteux.

Les résultats dépendent, comme nous allons le voir, du milieu ambiant ; de sorte qu'on ne peut dire si les gaz sont magnétiques ou diamagnétiques, mais seulement, que l'oxygène est plus magnétique ou moins diamagnétique que l'air, et les autres gaz, moins magnétiques ou plus diamagnétiques que lui. Alors M. Plucker a cherché à reconnaître s'il y avait attraction ou répulsion, en observant les changements de pression que doit subir une masse gazeuse confinée, sous l'influence d'un électro-aimant appelant le gaz près de ses pôles, ou l'en éloignant. Il a donc disposé entre les parties arrondies des pièces polaires *a*, *a* (*fig.* 1334) un thermomètre *à air* *t*, *t*, dont le réservoir était formé d'une enveloppe mince en laiton, se moulant exactement sur le contour de ces pièces, et il a vu l'index liquide du tube, s'avancer de 2 à 3^{mm} vers l'orifice, au moment où il lançait le courant dans l'électro-aimant. Il résulterait de là que l'air serait diamagnétique. Mais le résultat était dû à une répulsion exercée sur les parois flexibles du thermoscope. En effet, M. Faraday ayant repris ces expériences en employant pour parois, les surfaces mêmes des pièces polaires, auxquelles il donnait des formes très variées, il n'a pu obtenir le moindre déplacement de l'index observé au microscope, quel que fût le gaz qui remplissait la cavité. Cependant les dimensions de l'appareil étaient telles qu'un accroissement de volume de $\frac{1}{100000}$ eût été sensible. Si donc il y a changement de pression dans le gaz près des faces polaires, ce changement doit être bien faible, à moins que les différentes parties n'étant pas aux mêmes distances des

champs magnétiques, la résultante ne soit attractive pour les unes et répulsive pour les autres, de manière à établir une sorte de compensation. Au reste, nous allons voir (1799) comment le sens du magnétisme des gaz a été déterminé directement par M. E. Becquerel.

1797. INFLUENCE DU MILIEU SUR LES ACTIONS DU MAGNÉTISME SUR LES CORPS. — M. Faraday a constaté un fait très important, c'est que le milieu dans lequel est plongé un corps, a une grande influence sur les résultats de l'action qu'exerce sur lui le magnétisme. Ainsi, une dissolution étendue de sulfate de fer, renfermée dans un tube de verre mince, est paramagnétique; mais, quand on plonge le tube dans une dissolution plus concentrée du même sulfate, il prend la direction équatoriale. Dans de l'eau pure, il reprend la direction axiale. Un tube rempli d'air paraît *magnétique* quand il est plongé dans le mercure, l'eau, l'alcool; et *diamagnétique*, dans une dissolution suffisamment concentrée d'un sel de fer, de cobalt, de maganèse de cérium. M. Plucker a vu un aréomètre placé au-dessus des pôles d'un fort aimant, s'enfoncer quand il était plongé dans un liquide diamagnétique, et s'élever dans un liquide magnétique. En général, un solide magnétique paraît diamagnétique dans un liquide plus magnétique que lui, et un corps diamagnétique semble magnétique dans un milieu plus diamagnétique. M. Faraday, a constaté aussi cette influence du milieu, dans le cas des gaz: il remplissait d'un certain gaz une boîte placée entre les pièces polaires de son électro-aimant, et faisait, au milieu de ce gaz, avec les tubes contenant du papier imbibé d'ammoniaque, les expériences que nous avons citées plus haut (1796). Il a reconnu ainsi que l'azote, qui est légèrement repoussé dans l'air, est attiré dans le gaz d'éclairage et dans l'hydrogène; le bioxyde d'azote, à peu prés indifférent dans l'air, est attiré dans l'acide carbonique. L'air est plus fortement attiré dans l'acide carbonique et l'hydrogéne, que dans le gaz d'éclairage.

M. Plucker et M E. Becquerel, chacun de leur côté, ont déduit de leurs expériences la loi suivante, dont l'analogie avec le principe d'Archimède (I,165) est facile à saisir: *l'action attractive ou répulsive exercée par un aimant sur un corps plongé, est égale à l'effet qu'éprouverait le corps dans le vide, diminué de l'effet produit sur le volume de fluide déplacé par ce corps.*

M. Plucker explique, au moyen de ce principe, l'influence qu'exerce le milieu ambiant sur les effets du magnétisme sur un même corps. M. E. Becquerel va beaucoup plus loin, et part de là pour établir une théorie trés ingénieuse, sur laquelle nous reviendrons (1802), par laquelle il cherche à expliquer le diamagnétisme.

1798. Expériences de M. E. Becquerel. — Pour établir par l'expérience le principe ci-dessus, il faut mesurer avec une grande précision les actions exercées sur des volumes égaux du fluide et du corps qui y est plongé. C'est ce qu'a fait M. E. Becquerel, au moyen de l'appareil suivant [1]. AC, AC

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXIV, p. 377.

(*fig.* 1338) sont les extrémités d'un énorme électro-aimant, dont le fer doux a 1 mètre de longueur, et 0m,11 de diamètre. Deux fils de cuivre de 2mm de diamètre et de 910m de longueur, pesant ensemble 50 kil., sont enroulés sur les deux branches ; on peut, en réunissant ces deux fils bout à bout, former un circuit de 1,820m. Les bases du cylindre de fer doux, bien dressées et placées horizontalement, supportent un socle en bois B, sur lequel repose une balance de torsion *rtmn*. La cage de cette balance est fixée avec de la cire molle, et ses faces antérieure et postérieure sont fermées par des glaces pouvant s'enlever à volonté. Le tube *t* est encastré dans un anneau en bois *bb'*, que l'on peut faire glisser sur le couvercle de la cage *mn*, dans deux directions perpendiculaires, au moyen de deux vis de rappel, dont une se voit en *v*. On peut ainsi, bien centrer le fil de torsion, après quoi l'on fixe l'anneau au moyen d'écrous à oreilles. Des pièces polaires *c*,*c*, dont la coupe se voit en *c''*, sont appliquées aux extrémités de l'électro-aimant, et reçoivent des barreaux de fer doux *d*,*d*,*d''*, qui sont continués en dedans de la cage *mn*, par deux autres petits barreaux, dont les extrémités intérieures forment en réalité les faces polaires actives. Les deux systèmes *cd*, *cd* ne sont pas sur le prolongement l'un de l'autre ; mais ils sont rejetés de part et d'autre du centre, comme on le voit en *c'd'*, *c'd'*, de manière à permettre de viser avec un microscope L, l'extrémité d'un petit barreau *a*, suspendu au fil de torsion. Ce barreau est attaché, sans étrier, au moyen d'un fil d'argent disposé comme on le voit en *a* et *a'*. Une balle de plomb, suspendue par le même moyen, plonge dans l'eau, afin d'amortir les oscillations du fil de torsion. Sur les deux bases du barreau *a*,*a'* sont tracés deux diamètres à angle droit, dont on fait coïncider le point de croisement, dans chaque expérience, avec le fil vertical du réticule du microscope L, ce qui s'obtient en faisant tourner convenablement le cercle divisé *r*. Le microscope est fixe, et placé de manière que le petit barreau *a* fasse un angle de 20° avec un plan parallèle aux pièces *d*, *d'*, quand la coïncidence a lieu.

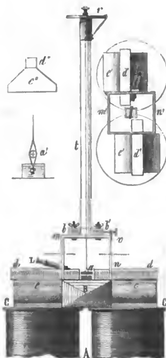


Fig. 1338.

La marche de l'expérience est maintenant facile à comprendre. Après avoir établi la coïncidence, on fait passer le courant dans l'électro-aimant, le barreau

a est dévié, et on le ramène à sa première position en faisant tourner le cercle *r*. L'angle de torsion mesure la force exercée, et, d'après le sens dans lequel il a fallu tourner, on voit si le petit barreau *a* est magnétique ou diamagnétique. Pour se mettre à l'abri des erreurs provenant du défaut de symétrie, on tourne le cercle *r*, de 180°, on fait une seconde observation sur l'autre extrémité du barreau, et l'on prend la moyenne.

Pour expérimenter dans les liquides, on remplace le vase dans lequel plonge la balle de plomb, par un autre vase à bords plus élevés rempli du liquide sur lequel on veut opérer.

Quand on veut comparer les effets produits sur une même substance dans des circonstances différentes, il se présente une cause d'erreur dont M. E. Becquerel a eu grand soin de tenir compte. Comme l'électro-aimant doit avoir une grande énergie, il fallait employer 30 à 40 couples à charbon donnant un courant qui n'était qu'à peu près constant. L'intensité de ce courant était mesurée par une boussole des sinus. M. E. Becquerel a d'abord constaté, comme nous le verrons, que la force de torsion nécessaire pour maintenir un même barreau dans sa position normale, est sensiblement proportionnelle au carré du *sinus* qui mesure l'intensité du courant. Il résulte de cette loi, qu'en divisant les angles de torsion obtenus, par les carrés des sinus observés, on ramène tous les résultats à l'unité d'intensité de courant. C'est ainsi qu'ont été obtenus les nombres du tableau suivant. Le signe (+) indique qu'il y a attraction, et le signe (—), qu'il ya répulsion,

MILIEUX DANS LESQUELS SONT PLONGÉS LES BARREAUX.	ACTION EXERCÉE SUR UN BARREAU DE	
	SOUFRE.	CIRE.
Air	— 0,9038	— 0,3485
Eau	— 0,1004	+ 0,2647
Dissolut. de chlorure de magnésium, concentrée	+ 0,0649	+ 0,3816
— de sulfate de nickel	— 2,6060	— 1,6733
— de protochlorure de fer, concentrée	— 53,7860	»

On voit combien est grande l'influence du milieu sur l'intensité, et même sur le sens de l'effet produit. Par exemple dans les dissolutions de *sulfate de nickel* et de *protochlorure de fer*, les répulsions sur le soufre sont *trois* fois et *soixante* fois plus grandes que dans l'air.

Les nombres du tableau représentent, d'après le principe ci-dessus (1797),

les différences entre le magnétisme, à volume égal, du barreau et du milieu environnant. En appelant V_s, V_a, V_e les effets produits sur des volumes égaux de *soufre*, *d'air* et *d'eau*, on aura donc

$$V_s - V_a = -0,9038, \quad V_s - V_e = -0,1004; \quad \text{d'où} \quad V_e - V_a = -1,1004;$$

pour représenter l'action exercée sur l'eau, dans l'air. On trouverait de même les actions exercées sur les autres liquides du tableau, telles qu'elles seraient dans l'air. M. E. Becquerel a pris pour terme de comparaison, l'action exercée sur un certain volume d'eau dans l'air, et il la représente par — 10 ; il trouve alors, en partant des expériences faites avec les barreaux de soufre et de cire, les nombres suivants :

	Eau,	*chlorure de magnésium,*	*sulfate de nickel,*	*protoch. de fer.*
Avec le soufre.	— 10	— 12,06	+ 21,19	+ 658,2
Avec la cire...	— 10	— 11,91	+ 21,60	»

Les nombres qui correspondent aux mêmes liquides étant très sensiblement les mêmes, M. E. Becquerel en conclut que la loi d'où il est parti pour les calculer est exacte. D'autres expériences, faites avec des barreaux de verre et de soufre plongés dans l'eau, dans des dissolutions de chlorure de sodium, de chlorure de calcium, de protosulfate de fer, ou dans l'alcool rectifié, l'ont conduit à la même conclusion.

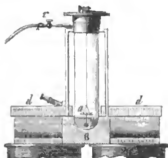


Fig. 1339.

1799. Magnétisme absolu de certains gaz. — M. E. Becquerel a pu constater, par la même méthode, que *l'oxygène* est *paramagnétique* ; ce que l'on n'avait pas pu encore décider. Pour opérer dans différents gaz ou dans le vide, il dispose l'appareil comme on le voit (*fig.* 1339). Le socle en bois B porte une cavité dans laquelle s'adapte une éprouvette de verre maintenue verticalement par deux montants en bois. Cette éprouvette porte à sa partie supérieure un couvercle et une virole en cuivre munie d'un robinet *r*, par lequel on peut faire le vide et introduire les gaz. La balle de plomb suspendue en *a* plonge dans une dissolution saturée de chlorure de calcium, qui ne donne pas d'humidité. Le fil de torsion est fixé à un petit treuil porté par un bouchon conique en cuivre s'adaptant exactement comme la clef d'un robinet. Le trou par lequel passe le fil de torsion est fermé avec de la cire, après qu'on a réglé la hauteur du barreau *a*.

Les premières expériences ont été faites sur l'air. Un petit tube de verre

très mince, fermé à ses deux extrémités, et suspendu à un fil d'argent de 0mm,045 de diamètre, était attiré; et l'angle de torsion qui mesurait l'attraction était de 6°,35. Le vide ayant été fait dans l'éprouvette, le tube fut plus fortement attiré, et pour le ramener à sa position primitive, il fallut augmenter la torsion de 1°,15. L'air ayant été introduit, la torsion nécessaire revint au terme de 6°,35. Avec l'oxygène, l'effet fut 5 fois plus grand qu'avec l'air; l'augmentation de torsion quand on eut fait le vide était de près de 5°. L'oxygéne et l'air sont donc *paramagnétiques*. L'hydrogéne, l'acide carbonique, ne donnérent pas d'effet appréciable. Il en fut de même de l'azote; d'où il faut conclure que l'air doit ses propriétés magnétiques à la présence de l'oxygéne, qui forme $\frac{1}{5}$ environ de son volume.

M. E. Becquerel a encore opéré par un moyen qui lui a permis de rendre ces résultats plus certains en les amplifiant, et d'obtenir des effets avec d'autres gaz que l'oxygéne et l'air. Ce moyen consiste à condenser dans les pores d'un cylindre de charbon, les gaz, que cette substance a la faculté d'absorber (I, 149). Un cylindre de charbon de chêne, ayant 35mm de longueur et 10mm de diamétre fut recuit au rouge dans du sable, puis suspendu en *a* dans l'éprouvette (*fig.* 1339). Il éprouva dans le vide une répulsion mesurée par un angle de torsion de — 3°,85. L'éprouvette ayant été remplie *d'oxygène* sec, il y eut une attraction mesurée par un angle de +18°,55. Or, le charbon avait absorbé environ 9,25 fois son volume de gaz. C'est donc en vertu d'un volume absorbé égal à 9,25 — 1 = 8,25, que le charbon était attiré, puisque le volume d'oxygéne ambiant agit pour donner une répulsion égale à celle qui correspond au volume de gaz déplacé. Avec *l'air*, l'attraction correspondait à +1°,2 de torsion. Avec *l'acide carbonique* et le *protoxyde d'azote*, la force répulsive du charbon fut un peu augmentée; de —1°,9 et —1°,6 à —2°,90 et —2°,50, nombres trop faibles pour ne pas laisser quelques doutes. *L'hydrogène* et *l'azote* n'ont donné aucun résultat appréciable. Il est vrai que le charbon ne condense pas tout à fait 2 volumes du premier, mais il condense jusqu'à 7,20 d'azote. M. E. Becquerel a plus tard vérifié ces résultats au moyen de la balance, par un procédé semblable à celui que nous allons décrire.

M. Plucker a fait de nombreuses expériences sur le magnétisme des gaz[1]. Au moyen de sa balance en verre (1794), à laquelle il suspendait un ballon à robinet, en verre trés mince, rempli du gaz à étudier. Les piéces polaires étaient échancrées de maniére à s'appliquer sur le contour du ballon. Aprés avoir établi l'équilibre pendant le passage du courant dans l'électro-aimant, on cherchait les poids nécessaires pour le rétablir aprés la suppression du courant. L'action sur le verre de la sphére vide avait été préalablement évaluée.

M. Plucker a trouvé par ce moyen que *l'hydrogène* est légérement repoussé. *Le bioxyde d'azote* est fortement magnétique, et à peu près comme si l'oxygéne y était simplement mélangé. *L'acide azoteux*, obtenu en mélangeant un volume

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXIV, p. 342.

d'oxygéne avec 4 volumes de bioxyde d'azote, est moins magnétique que ce dernier gaz. *L'acide hypo-azotique* est à peu prés insensible au magnétisme; l'introduction d'une certaine quantité d'oxygéne dans la sphére remplie de bioxyde d'azote, diminue donc l'attraction. L'acide hypo-azotique liquéfié par le froid est repoussé; il en est de même de l'acide azoteux liquéfié, tandis qu'il est magnétique à l'état gazeux. De plus, le gaz obtenu par l'évaporation du liquide est moins magnétique que celui qui a été préparé directement. M. Plucker en conclut que l'acide azoteux liquéfié, et le gaz qu'il donne en s'évaporant, ne sont pas identiques avec les gaz préparés directement. Ces résultats singuliers ne sont pas les seuls qu'ait observés M. Plucker: ayant rempli le ballon d'oxygène, et ayant placé dans le plateau opposé de la balance le dixième des poids nécessaires pour séparer le ballon des pièces polaires, il le vit s'éloigner quand il supprima le courant. Ayant rétabli celui-ci, mais en sens inverse, il vit que la sphère était sensiblement *repoussée* avant de subir l'attraction; ce qui semble prouver que l'oxygéne se comporte comme un corps doué de *force coërcitive*.

1800. De la polarité diamagnétique. — Les corps magnétiques soumis à l'action d'un aimant, reçoivent, avant d'être attirés, une polarité en vertu de laquelle les éléments magnétiques sont tous disposés de la même manière, ou les *courants d'Ampère* tous dirigés dans le même sens que ceux de l'aimant; d'où il résulte des centres d'action. Il semble naturel d'admettre qu'il en soit ainsi dans les corps qui sont repoussés par les aimants, et que la répulsion soit précédée d'une polarité sans laquelle elle ne s'exercerait pas. Cependant l'existence de la *polarité diamagnétique* a été fort controversée, tant sont faibles les actions répulsives observées; elle a même été niée par plusieurs physiciens, tandis que d'autres la reconnaissaient et constataient en même temps que les pôles qui se forment dans les corps diamagnétiques sont de même nom que les pôles en présence qui les repoussent. Il faut donc admettre que, dans ce cas, les *courants d'Ampère* sont paralléles à ceux de l'aimant, mais dirigés en sens contraire.

M. Reich a, le premier, établi la polarité diamagnétique, par l'expérience suivante[1]; il suspendit une balle de bismuth au levier de la balance de Cavendisch modifiée par lui (I,142), et aprés avoir vérifié qu'elle était repoussée par l'un ou l'autre pôle d'un aimant en fer à cheval, il reconnut que, si l'on dispose ces pôles de manière qu'ils se trouvent à la même distance de la balle, il n'y a plus de répulsion, malgré l'extrême mobilité de l'appareil. Les actions répulsives des deux pôles ne s'ajoutent donc pas, mais l'effet est dû à leur différence, comme lorsqu'il s'agit des attractions sur le fer. Le premier effet du magnétisme sur le bismuth comme sur le fer, est donc d'y développer par influence une polarité préalable, d'où résulte ensuite la répulsion.

MM. Weber et Poggendorff ont cherché à confirmer l'existence de la polarité diamagnétique. M. Poggendorff approcha de l'extrémité d'un barreau de bis-

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXVI, p. 127.

muth placé dans la direction équatoriale entre les pièces polaires, un des pôles d'une petite aiguille aimantée située à une égale distance des branches de l'électro-aimant, de manière qu'elle n'en subit pas l'influence, et il vit que le pôle de cette aiguille était repoussé par l'extrémité du barreau qui l'aurait attiré, si, au lieu d'être en bismuth, ce barreau eût été en fer.

M. Weber plaçait un barreau de bismuth dans une hélice parcourue par un courant, et observait que les effets produits par ses extrémités sur les pôles d'une aiguille aimantée, étaient inverses des effets qu'aurait produits un barreau de fer. Pour rendre les résultats plus sensibles, on changeait la position du barreau de bismuth à la fin de chaque oscillation de l'aiguille. Mais dans ces mouvements, il se produit des courants d'induction dans le barreau, comme M. Faraday l'a constaté dans une belle série d'expériences [1] qui lui ont montré que les effets n'augmentent pas avec le pouvoir diamagnétique des barreaux, mais avec leur conductibilité, ainsi que M. de La Rive l'avait déjà reconnu. De plus, ces effets disparaissent quand on remplace le barreau par un faisceau de fils de même métal; et M. Von Feillitzsch, ayant remplacé le barreau métallique par des bâtons de cire, ou de verre pesant, substances diamagnétiques, mais isolantes, n'obtint aucun résultat.

M. Plucker et M. H. C. Œrsted ont cherché à prouver la polarité diamagnétique, en faisant agir sur les corps diamagnétiques placés entre les pôles d'un électro-aimant, des lames de fer doux qui en subissaient l'influence; mais M. Faraday a reproché, avec raison, à cette méthode de ne pouvoir donner de résultats concluants, parce que la distribution des forces dans le champ magnétique de l'électro-aimant est modifiée par l'approche des pièces de fer. M. Matteucci a cherché, mais en vain, à modifier les oscillations d'une petite aiguille de bismuth oscillant entre les pôles d'un aimant, en en approchant des masses du même métal. — Le même physicien a fait de nouvelles tentatives par le moyen qui suit : un système de courants astatiques était suspendu au milieu d'un carré, aux quatre angles duquel étaient placées des hélices verticales égales, de manière qu'il n'y avait aucune déviation quand on faisait passer des décharges dans les hélices. Si l'on introduisait dans l'intérieur des deux hélices opposées, des cylindres de cire mélangé avec des quantités, même très petites, d'oxyde de fer, la déviation se manifestait au moment de la décharge ; mais si l'on remplaçait ces cylindres par des barreanx en bismuth, il n'y avait aucun effet.

Expériences de M. Tyndall. — L'existence de la polarité diamagnétique restait donc toujours douteuse. C'est à M. Tyndall qu'il était réservé de la prouver [2]. La *fig.* 1340 représente l'appareil qu'il a fait construire, d'après les indications de M. Weber. Deux hélices égales et verticales *hh*, *h'h'*, de 2^{cm} de diamètre intérieur, sont enroulées sur des tubes de cuivre qui les dépassent

[1] *Bibl. univ. de Genève* (Arch des sc.), t. XVI, p. 89.

[2] *Bibl. univ. de Genève* (Arch. des Sc.), t. XXXII, p. 89.

en *t*, *t'*, et reçoivent, en sens contraire, un même courant. Elles sont fixées à une forte planche appliquée contre un mur, et dans leur intérieur, sont suspendus deux petits barreaux diamagnétiques *l*, *l'*, attachés à un cordon sans fin qui passe sur deux poulies P, P'. Un système astatique d'aimants horizontaux *sn*, que l'on voit en projection en NS, N'S', est suspendu à la hauteur du milieu des hélices, H, H', par des fils de soie, attachés au centre d'un cercle de torsion *r*. Ce cercle peut tourner indépendamment de la vis *v*, qui prend son écrou dans une traverse en cuivre fixée aux extrémités des tubes de cuivre *t*, *t'*. Les deux aimants *sn*, NS, N'S', sont renfermés dans une boîte en cuivre *aa'*, destinée à amortir leurs oscillations ; ils sont réunis par une tige de laiton, sur laquelle on peut les rapprocher plus ou moins. Un miroir *m*, M, est destiné à observer les déviations du système des aimants, par la réflexion d'une échelle horizontale éloignée, suivant la méthode de M. Gauss (1247). Tout l'appareil est renfermé dans une cage dont la paroi antérieure s'enlève à volonté.

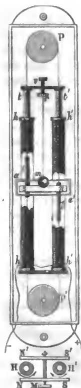


Fig. 1340.

Si nous supposons que les barreaux diamagnétiques éprouvent la polarité pendant le passage du courant dans les hélices, le système des aimants ne sera pas dévié tant que les milieux de ces barreaux seront à la hauteur des aimants ; les actions exercées sur chacun de ces derniers s'entre-détruisant. Cet équilibre n'a jamais lieu exactement, à cause du défaut d'identité des hélices et des aimants ; mais on peut toujours l'établir au moyen d'un circuit auxiliaire placé à quelque distance. Si ensuite, en faisant tourner la poulie P, on amène les barreaux à avoir, l'un, *l'*, son extrémité supérieure, l'autre, *l*, son extrémité inférieure dans le plan des aimants, comme dans la figure, ces extrémités ayant une polarité contraire, agiront concurremment, pour dévier le système des aimants. Si l'on abaisse à son tour le barreau *l*, et si l'on élève *l'*, la déviation aura lieu en sens contraire. L'appareil est tellement sensible, que les plus faibles agitations de l'air déplacent les aimants ; c'est pourquoi on met de la ouate ou des feuilles de papier dans la boîte de cuivre *aa'*, partout où ces corps ne peuvent gêner les mouvements des aimants.

M. Tyndall a fait un grand nombre d'expériences avec cet appareil. Des barreaux de bismuth lui ont donné, en les faisant passer de la position indiquée dans la figure à l'autre position, une déviation de 25 divisions de son échelle. Quand il renversait le courant dans les hélices, les déviations se manifestaient en sens contraire. Ces résultats, constatés à diverses reprises, ne peuvent être attribués à des courants d'induction développés dans le bismuth ; car : 1° les déviations persistent pendant l'état de repos des barreaux ; 2° elles

se produisent avec le bismuth pulvérisé, quoique l'oxydation superficielle des parcelles en rende la masse assez peu conductrice pour qu'elle intercepte le courant d'une pile ; 3° ces déviations sont à peine sensibles avec le cuivre, qui, cependant, conduit 40 fois mieux que le bismuth ; 4° enfin, elles se manifestent, quoique faiblement, avec les substances non conductrices : verre pesant, spath d'Islande, marbre, phosphore, soufre, eau, sulfure de carbone... Les liquides sont renfermés dans des tubes en verre mince. Des substances *magnétiques*, limaille, oxyde de fer, sulfate, carbonate et chlorure de fer, ardoises, dissolutions de sels de fer, nickel, cobalt..., ayant été substituées aux barreaux diamagnétiques, le système des aimants éprouva une déviation, mais en sens contraire de celle que produisent, dans les mêmes circonstances, les corps *diamagnétiques*.

Ces belles expériences mettent hors de doute l'existence de la polarité diamagnétique. Il eût été bien difficile de concevoir qu'elle ne précédât pas la répulsion exercée par les aimants ; car il faudrait alors admettre une action du magnétisme sur la matière, ce qui serait tout à fait opposé aux idées que nous nous formons de la manière d'agir des agents impondérables. En outre, les lois suivant lesquelles varient les actions diamagnétiques, lois dont nous allons parler, conduisaient à admettre la polarité. On s'explique donc bien les efforts persévérants des physiciens pour la prouver par l'expérience ; mais les effets qu'elle produit sont tellement faibles, qu'il fallait, pour les discerner, un appareil d'une délicatesse extrême.

1801. Relation entre les actions diamagnétiques et l'intensité du courant. — Il résulte des expériences de MM. E. Becquerel, Tyndall, Plucker, Reich, que *les actions diamagnétiques varient sensiblement en raison du carré de l'intensité du courant*. M. E. Becquerel a établi cette loi au moyen de l'appareil (*fig.* 1338). L'intensité du courant était mesurée par une boussole des sinus placée dans une chambre séparée, très loin de l'électro-aimant. Ce courant a été fourni successivement par 20, 17, 14, 10 couples à charbon ; ce n'est donc qu'entre les limites d'intensité correspondantes, que la loi a été vérifiée ; et, en effet, la théorie des électro-aimants indiquait qu'elle ne peut être vraie que lorsqu'ils sont loin du maximum d'aimantation. Voici comment M. E. Becquerel rend compte de la loi, en partant de la polarité développée dans les corps par l'électro-aimant : un aimant d'une intensité I, développe dans une molécule placée à une distance 1, une force ($\pm ml$), m étant une constante ; d'où il résulte un effet dont l'intensité sera représentée par $(\pm ml) \times I$, ou $\pm ml^2$. Or, l'intensité magnétique I d'un électro-aimant est proportionnelle à l'intensité du courant tant qu'on reste assez éloigné du point de saturation (1670). Donc, dans ces limites, les actions magnétiques, ou diamagnétiques, sont proportionnelles au carré de l'intensité du courant.

1802. De l'explication du diamagnétisme. — M. Faraday, d'accord avec la plupart des physiciens, regarde le diamagnétisme comme une propriété spéciale, distincte du magnétisme. On avait été tenté d'abord de considérer

la direction équatoriale comme provenant d'une distribution particulière du magnétisme ordinaire dans les barreaux. Mais nous avons vu que des masses non allongées sont directement repoussées par les pôles de l'électro-aimant. M. E Becquerel, à la suite de ses belles recherches citées plus haut (1798), a proposé la théorie suivante.

Théorie de M. E. Becquerel. — M. E. Becquerel repousse l'existence du diamagnétisme comme phénoméne particulier. Il suppose que tous les corps sont plus ou moins attirés par les aimants; s'il y a répulsion pour certains d'entre eux, cela tient à ce qu'ils sont moins magnétiques que le milieu dans lequel ils sont plongés (1797); de même que les corps pesants s'éloignent de la surface de la terre, quand ils pèsent moins, à égal volume, que le milieu environnant. Voici comment M. E. Becquerel applique le principe à sa théorie : soit C un centre magnétique placé dans l'intérieur d'un milieu attirable à l'aimant. Il s'établira dans ce milieu un certain état d'équilibre, dans lequel il y aura un accroissement de pression dans les parties les plus rapprochées du centre C. Si nous séparons, par la pensée, une masse limitée m du fluide, elle sera attirée vers C avec une certaine force f, et comme cette masse reste en équilibre, il faut qu'elle soit soumise à une force, $-f$, égale et opposée. Si maintenant on remplace la masse m par une masse M d'une autre substance, de même forme et de même volume, qui soit sollicitée par le centre C avec une force F, la force $-f$ agissant sur cette masse M, comme elle agissait sur la masse m du fluide, l'effet observé sera dû à la différence $F-f$; et, suivant que cette différence sera positive ou négative, la masse m sera *paramagnétique* ou *diamagnétique*. — Une objection se présente immédiatement : c'est qu'il existe beaucoup de corps qui sont diamagnétiques dans le vide. M. E. Becquerel a cherché à lever la difficulté en admettant que *l'éther* qui remplit le vide, est magnétique et plus magnétique que les substances qui prennent dans le vide la direction équatoriale. Il faudrait donc supposer que l'éther produit des pressions sur les corps, à la manière des fluides pondérables, ce qu'il semble bien difficile d'admettre. D'un autre côté, la polarité diamagnétique qui est de nature contraire à celle qui se produit dans les corps magnétiques, semble indiquer une opposition tranchée entre les deux ordres de phénomènes.

M. Weber a proposé une autre théorie qui a été reprise et complétée par M. de La Rive, et présentée par lui de la manière suivante [1] : il faut supposer d'abord que chaque atome des corps possède une polarité naturelle, en vertu de laquelle de l'électricité négative tend à s'accumuler en un certain point a de cet atome m (*fig.* 1341), et de l'électricité positive, au point opposé b. Si l'atome est seul et bon conducteur, ces électricités se recombineront par sa surface, en formant des courants de sens contraire à ceux qui se forment, par une cause quelconque, dans son intérieur, pour y rétablir continuellement la

[1] *Traité d'électricité théorique et appliquée* (1854), t. I, p. 569.

tension polaire, et les actions que ces courants tendraient à produire à l'extérieur s'entre-détruiront. Si maintenant on suppose que l'atome *m* fait partie d'un groupe moléculaire, tous les atomes du groupe agiront les uns sur les autres, de manière que les pôles contraires soient en regard, comme on le voit dans la figure; les électricités, au lieu de se recombiner par la surface de chaque atome, formeront des décharges intermoléculaires, et par conséquent un courant dirigé dans le sens des flèches extérieures. Les courants semblables qui existent dans tous les groupes moléculaires ne sont autre chose que les *courants d'Ampère* (1741); ils ont des directions très diverses, et l'aimantation les amène au parallélisme. Ces courants ne peuvent se propager à travers les atomes du groupe, qu'autant que ces atomes sont suffisamment rapprochés. Or, nous allons voir, en étudiant le magnétisme spécifique (1711), que les corps les plus magnétiques sont, en général, ceux dont les atomes sont le plus rapprochés, ou ceux qui en renferment le plus grand nombre dans l'unité de volume. Nous verrons aussi que la chaleur, qui écarte les atomes des corps, diminue leur puissance magnétique, et peut même la faire disparaître. Les corps *diamagnétiques* sont ceux dont les atomes sont très écartés. Cependant, le *zinc* et le *cuivre*, dont les atomes sont très rapprochés, sont un peu diamagnétiques. M. de La Rive explique cette anomalie en observant que ces métaux étant de très bons conducteurs, la recomposition des fluides doit se faire par la surface de chaque atome, malgré leur faible distance; et, à l'appui de cette explication, il fait remarquer que, si l'on combine le cuivre avec le chlore ou l'oxygène, qui diminuent sa conductibilité, il devient magnétique. L'oxygène est le seul gaz magnétique; M. de La Rive en conclut que ses atomes sont arrangés en groupes très serrés, et il rapproche cette hypothèse de l'explication qui a été donnée de l'*oxygène ozoné*, que certains physiciens considèrent comme de l'oxygène dont les groupes moléculaires auraient été désagrégés (1579).

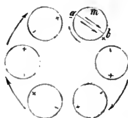


Fig. 1341.

Pour expliquer le *diamagnétisme*, M. de La Rive remarque que les atomes des corps repoussés par les aimants sont très écartés, de manière qu'ils ne peuvent agir les uns sur les autres, et présentent l'état indiqué dans l'atome isolé *m* (*fig.* 1341). Mais si l'on présente aux atomes polarisés et indépendants les uns des autres, un courant, ou le système des courants d'Ampère constituant un aimant, ces atomes seront orientés par les molécules polarisées dans le courant, comme cela a lieu dans l'induction (1747), et de manière que les pôles contraires étant en regard, ces atomes se placeront, dans le groupe moléculaire qu'ils forment, dans le même ordre que ceux de la *fig.* 1341; mais leur arrangement sera tel que les pôles en présence dans les atomes du courant et dans ceux qui en subissent l'influence, seront partout de signe contraire.

Si maintenant l'action exercée est assez énergique, la polarité des atomes du groupe moléculaire sera augmentée par leur influence mutuelle, et des décharges auront lieu qui détermineront un courant de sens opposé à celui de l'aimant. Il y aura donc répulsion. On voit que la différence entre les corps *magnétiques* et les corps *diamagnétiques* tient surtout à ce que, dans les premiers, les courants préexistent autour des groupes moléculaires ; tandis qu'ils ne prennent naissance dans les autres que sous l'influence de courants énergiques capables de diriger les atomes. Nous verrons plus loin des phénomènes diamagnétiques produits par les cristaux, qui viennent confirmer cette ingénieuse théorie. Mais malheureusement le *potassium* et le *sodium*, dont les atomes sont plus écartés que ceux du bismuth, sont, d'après M. Lamy, un peu *magnétiques*, et leur conductibilité est intermédiaire entre celle du fer et du cuivre[1].

II. Magnétisme spécifique.

1803. L'action exercée par un aimant sur un corps magnétique ou diamagnétique dépend de la force de l'aimant, et en même temps de la *polarité* moléculaire que peut acquérir le corps. Plusieurs physiciens se sont appliqués à chercher les rapports entre les intensités des actions exercées par un même aimant sur divers corps de même volume et de même forme, placés à la même distance. M. E. Becquerel a donné le nom de *magnétisme spécifique* à l'action exercée par un aimant sur l'unité de volume du corps placé à l'unité de distance, action comparée à celle qui s'exerce sur une certaine substance prise pour terme de comparaison. On peut encore comparer les effets produits sur une petite aiguille aimantée, par un cube égal à l'unité de volume, placé à l'unité de distance de cette aiguille. Les substances comparées ne doivent jamais conserver d'aimantation permanente. Avant la découverte de l'universalité du magnétisme, on avait cherché à comparer ce que l'on appelait la *puissance magnétique* des corps magnétiques proprement dits. Nous allons d'abord nous occuper de ce cas particulier.

1804. I. MAGNÉTISME SPÉCIFIQUE DES CORPS MAGNÉTIQUES PROPREMENT DITS. — Dès 1822, M. Barlow avait comparé les pouvoirs magnétiques du fer et de quelques-uns de ses composés, en observant leurs effets sur une aiguille aimantée, et il avait trouvé qu'en représentant par 100 l'action exercée par le fer doux, celle qui correspond à différentes espèces d'acier est comprise entre 74 et 66 avant la trempe, et entre 53 et 49 après la trempe; le fer fondu a donné le nombre 34[2].

M. E. Becquerel a fait un travail étendu sur le même sujet[3]. Il procédait en

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LI, p. 305.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XX, p. 108.

[3] *Comptes-rendus de l'Acad. des sc.* de Paris, t. XX p. 1708, et *Traité de l'électr.*, (1856), t. III, p. 39.

faisant osciller un petit barreau de la substance à essayer, entre les pôles contraires de deux forts aimants. Le barreau était suspendu par un fil de cocon, sous une cloche de verre : on lui donnait toujours la même forme et le même volume. La masse ayant de l'influence sur la durée de l'oscillation, M. E. Becquerel a fait usage de la formule suivante, qui donne la force développée f en fonction de la masse P et de cette durée t :

$$[1] \qquad t = \pi l \sqrt{\frac{P}{3gf}}, \qquad \text{d'où} \qquad f = \frac{\pi^2 l^2 P}{3gt^2}.$$

l est la demi-longueur du barreau, et g la pesanteur.

Action sur une file de molécules. — Quand on veut, avec cette formule, calculer f pour des masses différentes d'une même substance, il ne suffit pas de changer la valeur de P ; car l'action magnétique exercée sur chaque molécule dépend de la forme du corps. Des expériences faites avec des faisceaux de fils de fer doux de même longueur, ont conduit à la loi suivante : *les cubes des temps des oscillations sont proportionnels aux poids de ces faisceaux, ou aux carrés des diamètres de barreaux cylindriques de même longueur et de même section que les faisceaux.* En introduisant cette loi dans la formule précédente, on obtient l'action sur une file élémentaire de molécules, et l'on trouve que cette action diminue quand le diamétre du barreau augmente, et qu'elle est à peu prés en raison inverse de la puissance $\frac{2}{3}$ du poids du barreau. En effet si P et P′ sont les poids de deux barreaux de même substance et de même longueur, t, t' les temps des oscillations, on a $P : P' = t^3 : t'^3$, d'où $P^{\frac{2}{3}} : P'^{\frac{2}{3}} = t^2 : t'^2$; mais la formule [1] donne le rapport des forces correspondantes $f : f' = Pt^2 : P't'^2$. En appelant n, n' les nombres de files de molécules dans les deux barreaux, p le poids d'une de ces files, on aura $P = np$, $P' = n'p$, et $f : f' = nt'^2 : n't^2$; d'où $\frac{f}{n} : \frac{f'}{n'} = t^2 : t'^2 = P^{\frac{2}{3}} : P'^{\frac{2}{3}}$. Or, $\frac{f}{n}$ et $\frac{f'}{n'}$ ne sont autre chose que les intensités moyennes des actions exercées sur une file de molécules dans chacun des barreaux.

La diminution d'effet sur chaque file, à mesure que leur nombre augmente, s'explique par leur influence mutuelle, comme cela a lieu dans les faisceaux aimantés (1714). En effet, si l'on éloigne ces files, en donnant au barreau la forme d'un tube de même poids, on trouve que l'action sur chacune d'elles est plus prononcée, que dans un barreau massif.

M. E. Becquerel a encore comparé les actions exercées sur du fer en limaille ou en poudre impalpable précipitée de l'oxyde par l'hydrogène, et disséminée régulièrement dans un cylindre de cire, ou mélangée dans un tube de papier avec de la limaille de zinc ou de cuivre. Il nomme *densité magnétique*, le poids du fer divisé par le volume du cylindre dans lequel il est disséminé. Il a trouvé ainsi que la force qui fait osciller une file de molécules magnétiques, est proportionnelle au carré de la densité magnétique, tant que les parcelles sont assez

rapprochées pour réagir facilement les unes sur les autres ; ce qui a lieu tant que la densité magnétique n'est pas inférieure à $\frac{1}{10}$. Quand les particules sont très éloignées, l'action élémentaire est proportionnelle à la densité, comme Coulomb l'avait reconnu. Entre ces deux limites, la loi est fort compliquée. Il résulte aussi de tous ces faits que l'action exercée sur le fer doux, ne change pas quand on le réduit en limaille ou en poudre impalpable, la densité magnétique restant la même.

En appliquant le même procédé à diverses substances, M. E. Becquerel a trouvé que le fer le plus doux est celui qui possède le magnétisme spécifique le plus prononcé, comme on pouvait le prévoir, la force coërcitive s'opposant au développement de la polarité qui précède l'attraction. Le nickel et le cobalt ont, *à poids égal*, sensiblement le même magnétisme spécifique que le fer doux ; celui de la fonte n'en est que les 0,80.

1805. Influence des actions mécaniques sur le magnétisme spécifique du fer. — Nous avons vu que les actions mécaniques qui modifient d'une manière permanente l'état moléculaire, exercent une grande influence sur l'aimantation que peuvent conserver le fer et l'acier. Ces mêmes actions affectent aussi le magnétisme spécifique, c'est-à-dire que, sous leur influence, la polarité magnétique produite par une cause donnée est plus ou moins modifiée, même quand les actions mécaniques n'altèrent que temporairement l'arrangement moléculaire ; quand le corps abandonné à lui-même, revient à son premier état, il reprend en même temps sa puissance magnétique primitive. On a expérimenté principalement sur la torsion.

Influence de la torsion. — Pour mettre en évidence les variations du magnétisme spécifique pendant la torsion, M. E. Becquerel a eu l'idée heureuse de se servir des courants induits que produit toute variation d'aimantation d'un barreau, dans une hélice qui l'enveloppe. Il suspendit donc verticalement un fil de fer bien recuit. Ce fil, tendu par un poids, traversait un tube de verre autour duquel était enroulée une hélice en rapport avec un réomètre très sensible à fil court. Toutes les fois qu'une torsion était imprimée au fil, l'aiguille du réomètre était déviée, toujours du même côté, quel que fût le sens de la torsion. Quand le fil revenait à son état d'équilibre, l'aiguille éprouvait une déviation contraire ; c'est que le fil de fer était aimanté sous l'influence de la terre, et que la torsion diminuant sa puissance magnétique, il se produisait brusquement un affaiblissement dans la polarité produite, d'où résultait, dans l'hélice, un courant induit instantané direct. Quand, la torsion étant détruite, la puissance magnétique et la polarité s'accroissaient brusquement, il se développait dans l'hélice un courant induit inverse. M. E. Becquerel a obtenu un courant continu, en laissant le fil osciller librement par torsion, et interposant dans le circuit du réomètre un commutateur qui renversait les courants produits chaque fois qu'ils changeaient de sens, c'est-à-dire aux instants où le fil oscillant passait par la position d'équilibre, et où il arrivait au maximum de torsion dans un sens ou dans l'autre.

M. Matteucci a fait de nombreuses expériences sur le même sujet, en employant, au lieu de fils, des barres de fer doux ou d'acier, aimantées par une hélice enveloppante, prés de laquelle se trouvait l'hélice dans laquelle devaient se développer les courants induits pendant la torsion [1].

M. Wertheim, à la suite de son beau travail sur la torsion (I,440), s'est occupé de l'influence qu'elle exerce sur le magnétisme. Il s'est servi pour cela de l'appareil (*fig.* 1342) déjà décrit (I,440). La barre est enveloppée par deux hélices placées l'une à la suite de l'autre, et n'occupant qu'une faible partie de sa longueur. La premiére, à gros fil, reçoit un courant qui aimante la barre. La seconde, à fil fin, est en rapport avec un réométre, et doit recevoir les courants induits ; son ouverture intérieure est assez large

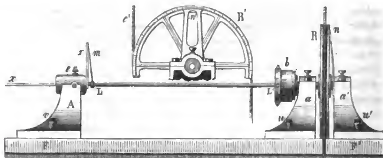


Fig. 1342.

pour que la distance de sa surface intérieure à des barres de différente grosseur, puisse être regardée comme constante. L'expérience a prouvé que les résultats restent les mêmes, quelle que soit la distance aux extrémités de la barre, de l'une ou de l'autre hélice. Toutes les expériences ont été répétées avec un appareil en bois muni d'étaux en bronze ; et les résultats sont restés les mêmes.

M. Wertheim a d'abord constaté, aprés Coulomb et M. Marianini (1678), que le fer le plus doux posséde toujours une certaine force coërcitive, et conserve un état de magnétisme permanent, dont les actions mécaniques temporaires accélérent l'établissement. Par exemple, une barre de fer aussi doux que possible, placée horizontalement, et aimantée par l'action terrestre, présentait, quand on la retournait bout à bout et qu'on essayait son pôle nord avec une petite aiguille aimantée, une force magnétique plus faible que celle qu'elle présentait dans la première position, c'est que la barre avait conservé presque la moitié de l'aimantation produite alors.

Cela posé, voici les principaux résultats constatés par M. Wertheim : 1° les

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences*, t. XXIV, p. 301 ; et XXXVI, p. 742.

torsions et détorsions ne produisent par elles-mêmes aucun magnétisme, car on n'observe pas de courant dans l'hélice induite, quand la barre est perpendiculaire au méridien magnétique. — 2° Si la barre est dirigée dans le méridien magnétique, ou soumise à l'action d'un aimant placé sur son prolongement, ou au courant de l'hélice magnétisante, les torsions et détorsions accélèrent l'action magnétisante de la cause extérieure ; mais une fois l'équilibre magnétique établi, les torsions affaiblissent l'aimantation totale, et les détorsions la ramènent à sa première valeur, comme l'indiquent les courants induits direct et inverse qui se succèdent alors. Ces courants sont mesurés par les *déviations impulsives* de l'aiguille du réomètre, lesquelles sont proportionnelles aux forces. On voit donc que le maximum d'aimantation a lieu dans l'état d'*équilibre mécanique*. 3° Si la barre est soustraite à l'action qui l'aimante, les torsions et les détorsions font rapidement disparaître l'excès d'aimantation temporaire, mais elles continuent indéfiniment à agir sur l'aimantation permanente, qui est diminuée par les torsions et rétablie par les détorsions. — 4° Quand la barre se trouve dans un état quelconque d'équilibre magnétique, tous les effets de la torsion sont proportionnels aux angles de torsion ; mais la grandeur de ces effets paraît dépendre beaucoup plus de l'aimantation permanente que de l'aimantation temporaire produite par la cause extérieure. Par exemple, dans une expérience, la suppression du courant de l'hélice magnétisante réduisit à un sixième l'état magnétique du barreau ; mais les variations d'intensité produites par la torsion sur le magnétisme permanent qui restait seul, ne furent pas même réduites à moitié. — 5° La forme de la section ne paraît pas avoir d'influence, mais les déviations augmentent avec son étendue et l'intensité de l'aimantation. — 6° Quand on essaie différentes espèces de fer, la marche est la même pour toutes ; il n'y a de différence que dans les intensités absolues des effets. Le fer le plus dur demande le plus de torsions et de détorsions pour arriver à son équilibre magnétique, qui est indiqué par l'égalité des courants opposés qu'elles produisent. — 7° L'acier présente avec le fer une différence fondamentale : plus il est trempé, plus il faut de torsions ou détorsions pour qu'il atteigne l'équilibre magnétique, quand il est soumis à l'aimantation. Une fois l'équilibre établi, M. Wertheim trouve que les torsions ou détorsions ne peuvent à elles seules le modifier, comme cela a lieu pour le fer. Mais M. Matteucci a toujours obtenu des courants induits très faibles, et d'autant plus faibles que la trempe était plus dure. — 8° Les fers durs ont présenté une anomalie qui n'a pas été expliquée ; souvent les déviations qu'ils produisent par la torsion sont plus grandes immédiatement après l'interruption du courant magnétisant, que pendant le passage de ce courant. Dans ce cas, il n'y a de diminution qu'au bout de quelque temps.

Au lieu de partir de la barre ne possédant aucune torsion, M. Wertheim a ensuite cherché quels sont les résultats quand on la met, avant de l'aimanter, dans un état de torsion temporaire ou permanente ; et il a reconnu que les résultats restent les mêmes, c'est-à-dire que le maximum magnétique cor-

respond, non à l'état de torsion qui sert de point de départ, mais à l'état qui correspond à l'équilibre mécanique. De sorte que, si l'on fait tourner la roue dans le sens qui diminue la torsion primitive, le magnétisme s'accroît, et qu'il diminue quand on revient à la torsion primitive. Mais si la torsion permanente qui sert de point de départ est produite pendant que la barre est soumise à l'action du courant aimantant, on observe la *rotation du maximum*, c'est-à-dire que le maximum se déplace, et dans le sens de la torsion ; et l'angle de rotation est d'autant plus prononcé que le fer est plus dur et la torsion permanente plus grande. Cet angle est toujours au-dessous de la moitié de la torsion temporaire qui a nécessairement lieu pendant qu'on produit une torsion permanente.

Si l'on interrompt le courant pendant qu'il existe une torsion permanente sans torsion temporaire, le maximum, qui appartient alors au magnétisme permanent qui subsiste seul, conserve la même rotation. Mais si l'interruption a lieu pendant que la barre est soumise à une torsion temporaire, il se produit une nouvelle rotation dans le sens de cette torsion. Cette rotation, toujours moindre que l'angle de torsion temporaire, est d'autant plus prononcée que le fer est plus *doux*; tandis que la rotation est plus grande avec le fer le plus dur, quand on la produit au moyen d'une torsion permanente produite pendant le passage du courant.

Traction, flexion. — M. Matteucci a reconnu qu'un allongement imprimé brusquement par tension à un fil de fer ou d'acier soumis à l'action d'une hélice magnétisante, produit une *augmentation* dans la force magnétique, et que le raccourcissement produit une diminution. Ces changements se reconnaissent par les courants induits dans une hélice enveloppante. Ayant introduit dans cette hélice un tube en cuivre rempli de limaille de fer, qu'il comprimait au moyen d'un piston à vis, M. Matteucci a reconnu que le magnétisme était augmenté par la compression. Quand il retirait le piston ou qu'il agitait la limaille, il y avait diminution du magnétisme. Le même physicien a encore expérimenté au moyen d'un très gros électro-aimant à deux branches, dont les hélices étaient indépendantes l'une de l'autre ; l'une servant à aimanter le fer doux, l'autre représentant l'hélice induite. Quand il imprimait un choc, une vibration, une compression au fer doux, il observait des courants induits, indiquant une augmentation de magnétisme. M. Wertheim a observé, depuis, quelques-uns de ces résultats ; il a trouvé, de plus, que la *flexion* ou la *déflexion* agissent comme la torsion et la détorsion. Tous ces phénomènes se conçoivent par les déplacements imprimés aux molécules (1677), lesquels favorisent leur arrangement, soit dans le sens convenable pour augmenter l'aimantation, soit dans le sens opposé.

M. Wertheim trouve dans l'augmentation de la capacité magnétique par la traction, l'explication de ce fait singulier, qu'un aimant que l'on charge graduellement devient de plus en plus fort (1228) ; lorsqu'on enlève la charge, l'aimant se raccourcit et ne peut plus la porter. Le même physicien explique

par les variations du magnétisme spécifique, dues aux flexions inévitables pendant la marche, l'impossibilité où l'on est de se fier aux indications de la boussole dans les grands navires en fer, les *compensateurs* (1233) ne tenant pas compte des variations que les flexions apportent à l'aimantation du fer par l'influence de la terre.

1806. MAGNÉTISME SPÉCIFIQUE DES CORPS DIAMAGNÉTIQUES OU PEU MAGNÉTIQUES. — M. Plucker a comparé les pouvoirs magnétiques d'un grand nombre de corps solides et liquides, au moyen de poids [1] : il suspendait par des cordons de soie, à la balance en verre renfermée dans la cage de son appareil (*fig.* 1334), un anneau mince en cuivre sur lequel il posait un verre de montre rempli de la substance à essayer, liquide ou réduite en poudre impalpable. Une plaque de verre prenant bien juste fermait le verre de montre, de manière qu'il contînt toujours des volumes égaux et de même forme des différentes substances. L'équilibre étant établi pendant le passage du courant dans l'électro-aimant, on cherchait les poids nécessaires pour le rétablir après la rupture du circuit. En divisant ensuite ces poids par la masse du corps, on obtenait la force exercée rapportée à l'unité de masse. Cela suppose que, pour une même substance, l'action exercée est proportionnelle à la masse. M. Plucker a cherché à vérifier ce principe en opérant sur des volumes égaux de cire, auxquels il mélangeait des quantités variables de fine limaille de fer. Dans toutes les expériences, il tenait compte de l'action exercée sur le verre de montre vide.

M. Plucker a déterminé ainsi le magnétisme spécifique d'un grand nombre de substances, principalement des composés du fer et des dissolutions de ses sels. En représentant par 100,000 le magnétisme du fer, il a trouvé, pour la pierre d'aimant, 40227; pour le fer oligiste, 533; pour l'oxyde brun, 71, nombre le plus faible pour les composés du fer, solides ou liquides.

Voici quelques-uns des résultats relatifs aux substances *diamagnétiques*, à la température ordinaire et *à poids égal*, par rapport à l'eau :

Eau	100	1	Fleur de soufre	71	$\frac{3}{4}$
Phosphore	100		Sel marin	79	
Sulfure de carbone	102		Acide azotique	48	$\frac{1}{2}$
Acide chlorhydrique	102		Azotate de bismuth	35	$\frac{1}{3}$
Ether sulfurique	127	$\frac{5}{4}$	Acide sulfurique	34	
Essence de térébenthine	123		Mercure	23	$\frac{1}{4}$

On voit que les diamagnétismes des différents groupes sont exprimés à peu près par des rapports simples; mais on ne peut décider si ce résultat est dû au hasard, ou s'il exprime une loi réelle.

1807. Expériences de M. E. Becquerel. — M. E. Becquerel a déterminé le magnétisme spécifique d'un grand nombre de substances, au moyen des appareils que nous avons décrits plus haut (1798, 1799). Il mesurait l'intensité

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXIX, p. 138.

de l'action exercée par l'électro-aimant, soit par la torsion, soit avec la balance. Le magnétisme spécifique des liquides était déduit de la différence des actions exercées successivement sur un même barreau, dans le vide et dans le liquide en question. Le tableau suivant contient une partie des résultats obtenus par M. E. Becquerel; les substances marquées B ont été éprouvées avec la balance, et les autres, marquées T, par la torsion. Le magnétisme de l'eau est pris pour unité, et les résultats se rapportent à des *volumes égaux*.

SOLIDES.	MAGNÉTISME SPÉCIFIQUE dans l'air.	LIQUIDES. (T)	POIDS SPÉCIFIQUE.	MAGNÉTISME SPÉCIFIQUE dans l'air.
Eau.......... T.	— 1	Eau..............	1	— 1
Zinc.......... T.	— 0,25	Alcool............	0,8059	— 0,97
Cire blanche.... T.	— 0,57	Dissolution de Ammoniaque.....	»	— 1,02
Soufre fondu.... T.	— 1,14	Dissolution de Sel marin.......	1,2084	— 1,13
Cuivre (galvanopl.) B	— 1,41	Dissolution de Chlorure de magné-		
Cuivre pur..... B.	— 1,68	sium........	1,3197	— 1,21
Plomb d'œuvre.. T.	— 1,53	Sulfure de carbone....	»	— 1,33?
Phosphore...... T.	— 1,64	Dissolution de Sulfate de cuivre..	1,1265	+ 0,81
Sélénium...... T.	— 1,65	Dissolution de Sulfate de nickel..	1,0827	+ 2,16
Argent pur..... B.	— 2,32	Dissolution de Protosulfate de fer.	1,1728	+ 18,02
Or (pépite) .... B.	— 2,41	Id.........	1,1923	+ 21,12
Or pur........ B.	— 3,47	Dissolution de Protochlorure de fer	1,0695	+ 9,19
Bismuth....... T.	— 21,76	Id.........	1,2767	+ 36,07
Bismuth....... B.	— 22,67	Id. concentrée.	1,4334	+ 65,01

On voit que la *cire* et le *zinc* sont moins repoussés que l'eau et les autres liquides diamagnétiques : on en doit conclure que ces corps seraient attirés dans ces liquides ; c'est, en effet, ce que montre l'expérience. On voit aussi que le *bismuth* est le plus diamagnétique des corps, et qu'il les dépasse tous de beaucoup. Remarquons encore que les nombres qui précèdent sont relatifs aux échantillons qui ont servi aux expériences ; les plus petites parcelles de fer, et même, comme nous le verrons, l'état moléculaire des corps solides, peuvent notablement modifier les résultats.

Comparaison avec le magnétisme du fer. — M. E. Becquerel a ensuite rapporté le magnétisme spécifique des corps à celui du fer. Pour cela, il lui a fallu trouver le rapport entre le magnétisme de ce métal et celui de l'eau, qui lui avait d'abord servi de terme de comparaison. L'énorme pouvoir magnétique du fer rendait la comparaison difficile à faire directement; aussi, la solution concentrée de protochlorure de fer, dont le pouvoir est + 658,13 par rapport

à celui de l'eau représenté par — 10, a-t-elle servi d'intermédiaire. Cette solution a été introduite dans un tube en verre mince, de 4cm de longueur, suspendu entre les pôles contraires de deux barreaux aimantés, et l'on a comparé les oscillations de ce tube à celles d'un barreau de même longueur formé de cire mélangée avec un poids connu de limaille de fer doux. Les nombres d'oscillations de semblables barreaux sont indépendants de leur grosseur, et sont proportionnels aux quantités de limaille qu'ils contiennent. On a trouvé ainsi que le protochlorure de fer éprouve, à volume égal, la même action qu'une substance inerte renfermant 0,2 milligrammes de fer par centimètre cube. Le pouvoir magnétique de l'eau étant, par rapport au protochlorure de fer, égal à $\frac{-10}{+658,13} = 0,0152$, le pouvoir de l'eau sera égal à celui d'une substance inerte qui contiendrait $0,0152 \times 0,2 = 0^{mg},003$ de fer par centimètre cube ; mais il est de signe contraire. Chaque centimètre cube de fer massif pesant $7^{gr},788$, les pouvoirs magnétiques du fer, du protochlorure de fer et de l'eau, seront à volume égal, + 1 000 000 ; + 25,7 ; — 0,4 ; et à poids égal, + 1 000 000 ; + 140 ; — 3.

1808. Expériences de M. Faraday. — M. Faraday, en 1853, a comparé les pouvoirs magnétiques d'un grand nombre de substances, par la méthode de torsion [1]. Il suspendait, par un fil de platine, entre les pièces polaires d'un aimant en fer à cheval pouvant porter 200 kil., un barreau de la substance à étudier, et le ramenait dans la direction axiale, au moyen de la torsion. Au barreau était fixé un petit miroir, au moyen duquel on pouvait, en suivant la méthode de M. Gauss (1247), obtenir ce résultat avec une grande précision. Le tableau qui suit contient une partie des résultats trouvés par M. Faraday ; ils sont rapportés à l'eau, et ont été obtenus à la température de 15°,5, et pour les gaz, à la pression de $0^m,76$. Enfin, les nombres correspondent à des *volumes égaux* de chaque substance observée dans le vide.

SUBSTANCES.	POUVOIRS.	SUBSTANCES.	POUVOIRS.	SUBSTANCES.	POUVOIRS.
Proto-ammoniure de		Cyanogène.	—0,009	Acide azotique. . . .	—0,911
cuivre.	+1,390	Verre.	—0,188	Ammoniaq. liquide.	—1,010
Per-ammoniure de		Zinc pur.	—0,772	Bisulfure de car-	
cuivre.	+1,240	Ether.	—8,797	bone.	—1,031
Oxygène.	+0 181	Alcool absolu. . . .	—0,815	Azotate de potasse	
Air.	+0,035	Essence de citron. .	—0,828	(saturé).	—1,036
Gaz oléfiant. . . .	+0,006	Camphre	—0,855	Acide sulfurique. . .	—1,081
Azote.	+0,003	Camphine.	—0,859	Soufre.	—1,221
Acide carbonique. .	0,000	Huile de lin. . . .	—0,886	Chlorure d'arsenic. .	—1,260
Hydrogène.	—0,001	Huile d'olive. . . .	—0,886	Borate de pl. fondu.	—1,413
Gaz ammoniac. . .	—0,005	Cire.	—0,887	Bismuth.	—20,309

[1] *Bibl. de Gen.* (Arch. des Sc.), t. XXIII, p. 105 ; et *Rech. expérim.*, t. III, 497.

1809. Lois et résultats généraux. — On avait cru pouvoir admettre cette loi, que les corps simples les plus *magnétiques* sont ceux dont le *volume atomique* (rapport de l'équivalent à la densité) est le plus petit, ou dont les atomes sont le plus rapprochés ; et que les corps diamagnétiques sont ceux dont les atomes sont le plus écartés. Ce fait curieux, déjà remarqué pour les corps magnétiques proprement dits, a été vérifié depuis sur beaucoup d'autres substances. Dans la liste qui suit, les nombres placés à droite représentent les volumes atomiques.

Nickel	42	Chrome; titane	54	Or; argent	63
Cobalt	43	Platine; osmium	57	Mercure	91
Manganèse	43	*Zinc*	58	Plomb	1136
Cuirre	44	Sodium	147	Antimoine	126
Fer	44	Potassium	292	Bismuth	134

La troisième colonne est composée des métaux *diamagnétiques*. Dans les deux premières, nous trouvons le *cuivre* et le *zinc*, qui sont *diamagnétiques ;* nous avons vu comment M. de La Rive explique cette anomalie, en faisant intervenir la conductibilité (1802). Mais nous voyons que le fer, le plus magnétique des corps, n'a pas le volume atomique le plus faible. En outre, le potassium et le sodium, dont le *volume atomique* est le plus grand, sont *magnétiques*, d'après M. Lamy. La loi ne peut donc, dans l'état actuel de la science, être regardée comme exacte.

M. Matteucci a prouvé directement l'influence de la conductibilité des métaux sur leur pouvoir diamagnétique [1] ; car il a constaté que ce pouvoir augmente proportionnellement à leur résistance à la conductibilité, et, quand on les divise, proportionnellement au degré de division. Or, en divisant un corps, on diminue sa conductibilité, au point d'intercepter le passage d'un courant. Par exemple. en appelant 1 le pouvoir diamagnétique de chaque métal massif, le cuivre a donné de 1,6 à 2,90 en poudre fine ; l'or, de 1,36 à 1,73 ; l'argent, de 1,12 à 1,55, suivant l'état de division. Avec le bismuth, les résultats ont été douteux, mais la poudre de ce métal est conductrice, parce que, étant obtenue mécaniquement, elle n'est pas aussi fine que les poudres obtenues par précipitation chimique. Les substances non conductrices, comme le soufre, la résine, l'acide stéarique, la craie, ne changent pas de pouvoir diamagnétique quand on les réduit en poudre impalpable. Dans ces expériences, le corps était renfermé en fragments ou en poudre impalpable, dans une boule de verre mince, fixée à l'extrémité d'un long levier suspendu par un fil de torsion.

Corps composés. — On a cherché en vain à saisir quelque relation entre les pouvoirs magnétiques ou diamagnétiques des corps composés, et les pouvoirs de leurs éléments. Cependant, on remarque que les combinaisons

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XLIV, p. 242 et 625.

de fer sont en général magnétiques ; mais, avec ce métal même, on trouve des exceptions : ainsi, nous avons vu que les deux cyanoferrures de potassium sont diamagnétiques. L'état de combinaison semble donc modifier les tendances magnétiques des atomes ; ce qui est bien d'accord, du reste, avec l'influence qu'exerce l'arrangement moléculaire sur le magnétisme (1811).

Mélanges. — Quand les substances sont *mélangées*, on remarque que le pouvoir diamagnétique du mélange est sensiblement égal à la somme des pouvoirs des corps mélangés. M. Matteucci a établi cette loi, au moyen de mélanges de poudre d'argent et d'essence de térébenthine ; de poudres de soufre, colophane, craie, cuivre, bismuth, mélangées avec l'essence de térébenthine, l'huile d'olive, la benzine. Cependant les mêmes poudres mêlées avec de l'eau pure, salée, ou acidulée, ont formé des mélanges dont le pouvoir dépassait constamment, à peu près de $\frac{1}{10}$, la somme calculée.

1810. Magnétisme spécifique de l'oxygène et de l'air. — M. Matteucci compare le magnétisme de l'oxygène à celui du protochlorure de fer, par le moyen suivant qui peut servir à montrer facilement que l'oxygène est magnétique. On introduit dans un tube rempli d'alcool, une grosse bulle d'oxygène, et l'on place ce tube transversalement entre les extrémités polaires hémisphériques d'un très-fort électro-aimant. Si la bulle est tangente à la ligne polaire, on la voit s'allonger vers cette ligne, et si son milieu se trouve sur cette ligne, elle se raccourcit. Si l'alcool est saturé de protochlorure de fer, dans le dernier cas, la bulle se partage en deux parties qui s'écartent l'une de l'autre. En cherchant par tâtonnement la proportion de protochlorure pour laquelle la bulle n'éprouve pas de changement appréciable de forme, on aura une dissolution ayant le même magnétisme que l'oxygène. M. Matteucci a trouvé ainsi que l'oxygène a le même magnétisme que la dissolution de protochlorure contenant 3 milligrammes de fer par centimètre cube.

M. E. Becquerel a fait de nombreuses expériences pour mesurer le magnétisme de l'oxygène comparé à celui de l'eau, et par suite, à celui du fer. Pour cela, il a suspendu dans son appareil (*fig.* 1339) un petit tube de verre rempli de cire, et il a observé les effets produits par l'électro-aimant sur ce tube quand il était dans le vide, dans l'oxygène, puis dans l'eau. Ces actions, à la température de 12°, furent, dans *l'oxygène* à la pression de $0^m,76$, $V_o = -0,2675$; dans le vide, $V_v = -0,1145$; et dans l'eau, $V_e = +0,7033$. On en conclut $V_o - V_v = +0,1530$, $V_e - V_v = -0,8178$, et pour le magnétisme de *l'oxygène* par rapport à l'eau dans le vide, $0,1530 : 0,8178 = 0,1871$. Ainsi, à volume égal, le pouvoir magnétique de l'oxygène est presque $\frac{1}{5}$ de celui de l'eau, mais de signe contraire. On trouve pour l'air, par le même moyen, le nombre 0,0377. Le calcul donne, en prenant les 0,21 du pouvoir de l'oxygène, le nombre 0,0392 ; ce qui montre que l'air doit son magnétisme à l'oxygène qu'il contient. M. Faraday et M. Matteucci sont arrivés à des résultats peu différents, que M. E. Becquerel a encore confirmés par la méthode de M. Plucker, au moyen de la balance, mais en renfermant le gaz dans des boules de verre très mince,

assez résistantes cependant pour qu'on pût y faire le vide. Il laissait un intervalle de 5 à 10mm entre la boule et les pièces polaires, pour éviter de rendre prédominante l'action sur le verre et sur le gaz adhérent. Enfin, M. E. Becquerel a constaté que le pouvoir magnétique de l'oxygène est proportionnel à sa pression ; loi qui vraisemblablement s'étend aux autres gaz.

Si l'on prend le pouvoir magnétique du fer pour terme de comparaison, et qu'on le représente par 1,000,000, on trouve, *à poids égal*, 377 pour l'oxygène et 88 pour l'air. L'oxygène, *à poids égal*, est près de 3 fois plus magnétique que le protochlorure de fer, qui est le liquide le plus magnétique. Il résulte de là que 1 mètre cube d'oxygène agirait sur une aiguille aimantée comme 54 centigrammes de fer ; et 1 mètre cube d'air, comme 11 centigrammes. L'atmosphère entière équivaut, sous le rapport magnétique, à une enveloppe de fer qui recouvrirait la terre, et aurait 0mm,1 d'épaisseur. On conçoit qu'une pareille couche continuellement agitée, puisse troubler l'aiguille aimantée, et que, son pouvoir magnétique dépendant de la température, comme nous allons le voir, son échauffement aux différentes heures du jour puisse concourir dans une certaine mesure à la production des variations diurnes.

1811. Influence de la température sur le magnétisme et le diamagnétisme. — M. Faraday a constaté que la chaleur diminue rapidement le pouvoir des corps magnétiques proprement dits, mais qu'elle ne l'anéantit jamais complètement, quand on emploie un électro-aimant très énergique. M. Plucker a confirmé ces résultats : ayant remplacé le verre de montre suspendu à la balance de son appareil (1794), par une capsule de porcelaine remplie de la substance, liquide ou en poudre, dans laquelle était plongé un thermomètre, il élevait fortement la température, il faisait ensuite de fréquentes pesées pendant le refroidissement. Il reconnut ainsi que le diamagnétisme et le magnétisme spécifique des solides et des liquides diminuent généralement quand leur température s'élève ; mais il y a des exceptions. Par exemple, le mercure ne change pas jusqu'à 300°. Il en est de même du soufre et de la stéarine, même au-delà de leur point de fusion ; M. Brunner a trouvé que l'eau, à l'état de glace et à l'état de vapeur, possède le même magnétisme spécifique qu'à l'état liquide.

M. Matteucci a fait des recherches suivies sur le même sujet[1]. Il a reconnu d'abord que le magnétisme du fer augmente jusqu'à une certaine température, puis décroît rapidement. Il a trouvé, entre 0° et 212°, que le pouvoir diamagnétique d'une aiguille de bismuth diminue à peu près proportionnellement à l'augmentation de température. Cette aiguille était suspendue par un fil de cocon, sous une cloche de verre remplie d'air, plongée dans un bain d'huile, et placée entre les pôles d'un électro-aimant. Ayant mis du bismuth dans une petite cuiller en chaux, fixée à l'extrémité d'un long levier suspendu par un fil de platine, il reconnut que le système était repoussé. Ayant fait chauffer la

[1] *Bibl. de Genève* (Arch. des sc.), t. XXIII, p. 24, et *Cours sur l'induction*, p. 219

cuiller jusqu'à fusion du bismuth, il constata une attraction qui se changea en répulsion au moment de la solidification. La cuiller avait été frottée légérement avec du papier teint d'oxyde de fer, de manière à être un peu attirée quand elle était vide. De plus l'expérience a prouvé qu'une petite auge allongée, en chaux remplie de bismuth fondu, oscillait aussi vite que lorsqu'elle était vide à la même température; d'où il résulte que le pouvoir diamagnétique du bismuth est insensible dans l'état de fusion. Le changement d'état des corps non métalliques et non cristallisés, comme le soufre, le phosphore, diminue à peine leur diamagnétisme.

M. Matteucci, ayant fait fondre un globule de fer dans la cuiller en chaux, au moyen du chalumeau de Newmann, a vu que ce globule était encore attiré. Mais il fallait, pour manifester cette attraction, un énorme électro-aimant, avec 30 couples de Grove. M. Matteucci évalue le pouvoir magnétique du fer en fusion à 0,000015 de son pouvoir à la température ordinaire. Il n'est donc pas étonnant qu'on ait avancé que le fer au rouge blanc cesse d'être magnétique quand on l'essaie avec les aimants proprement dits. Le cuivre, l'or des monnaies, le zinc, la porcelaine, certaines espèces de charbon, trouvés *magnétiques* à la température ordinaire, deviennent *diamagnétiques* à une température plus ou moins élevée. Le platine reste magnétique à l'état de fusion, et son pouvoir paraît à peine diminué.

La chaleur semble diminuer aussi le magnétisme des gaz. Ainsi, M. Faraday a vu l'air chaud être repoussé dans l'air froid (1796); il paraît donc moins magnétique que ce dernier. Mais M. E. Becquerel a conclu de ses expériences sur l'oxygéne, que l'influence de la chaleur n'a rien de réel, et que les diminutions que l'on observe proviennent seulement du changement de densité. Il opérait par des pesées, avec son ballon mince rempli de gaz entouré d'une étuve à double enveloppe placée sur l'électro-aimant, et dans laquelle il faisait passer un courant de vapeur d'eau.

III. Magnétisme et diamagnétisme des cristaux.

1812. Nous venons de voir que l'état de division et la fusion apportent des changements dans le magnétisme de certains corps. L'arrangement moléculaire a donc une influence sur cette propriété; et c'est surtout dans les cristaux que cette influence se manifeste d'une manière frappante. Dans ces sortes de corps, les molécules ne sont pas également rapprochées dans toutes les directions, et nous avons déjà vu comment la structure manifeste son influence, dans les expériences sur l'*élasticité*, la *dilatabilité*, la *conductibilité* pour la chaleur et pour l'électricité.

M. Plucker a découvert, vers 1849, le fait suivant : des lames de tourmaline taillées parallélement à l'axe du cristal se montrent magnétiques, à cause du

fer qu'elles renferment, quand on les suspend, de manière que l'axe soit vertical, entre les pôles d'un électro-aimant; mais elles prennent la direction équatoriale quand l'axe est horizontal. D'où il conclut que l'axe est repoussé, et que la répulsion l'emporte sur l'attraction que tend à produire le magnétisme de la substance. Le spath calcaire, qui est diamagnétique, se tourne de manière que son axe ait la direction axiale. La baryte, la dioptase, qui sont magnétiques, donnent des résultats semblables.

Vers la même époque, M. Faraday découvrait l'influence de la structure de certains cristaux métalliques sur leurs propriétés magnétiques [1]. Ayant remarqué qu'un barreau de bismuth suspendu entre les pôles d'un électro-aimant se comporte différemment suivant celle de ses arêtes qui se trouve à la partie supérieure, il attribua cet effet à la cristallisation du métal. Ayant alors isolé un cristal cubique de bismuth, et ayant mis en évidence la direction du clivage le plus brillant, en abattant un des angles solides, il reconnut que ce cristal, suspendu de manière que le plan du clivage fût vertical, se place de manière que ce plan se tourne vers l'un des pôles. Si la face de clivage est horizontale, le cristal ne se dirige plus. Des cristaux d'antimoine et d'arsenic donnent les mêmes résultats. Il est à remarquer que : 1° la force qui agit sur le cristal est purement directrice, et incapable de déplacer son centre de gravité ; 2° la direction se manifeste sous l'influence d'un seul pôle magnétique ; 3° un cristal peut se placer indifféremment dans les deux positions diamétralement opposées. Pour observer ces phénomènes, il faut que les pièces polaires soient terminées par des surfaces planes constituant un champ magnétique uniforme. Quand elles sont terminées en cônes, il se produit dans les points du cristal les plus rapprochés, des actions locales qui troublent les résultats, à moins qu'on ne rende ces actions locales insensibles par l'éloignement. MM. Plucker et Beer ont passé en revue un grand nombre de cristaux, relativement à la direction qu'ils prennent sous l'influence du magnétisme [2].

La force qui dirige un cristal de bismuth est assez grande pour se manifester avec un aimant capable de porter une quinzaine de kilos, ou avec une hélice réophore, et alors la face de clivage se place perpendiculairement à l'axe de cette hélice. M. Faraday a même vu un cristal de bismuth se diriger sous l'influence de la terre, mais très faiblement. M. Plucker a découvert qu'un cristal de *cyanite* se dirige par la terre, et de manière à présenter toujours le même point au nord. Un semblable cristal peut donc remplacer la boussole. Un cristal de *stannite* ou oxyde d'étain, présente ce phénomène d'une manière encore plus marquée ; son axe cristallin se place dans le méridien magnétique ; de plus, ce cristal peut dévier alors une petite aiguille aimantée très mobile.

1813. Explication des phénomènes magnéto-cristallins — M. Plucker

[1] *Bibl. univ. de Genève* (Arch. des sc.), t. XII, 89 ; et *Ann. de ch. et de phys.*, 3e série, t. XXXVI, 247.

[2] *Pogg. Ann.*, LXXXI, 115 ; et *Ann. de ch. et de ph.*, 3e série, t. XLIX, 221.

avait cherché à rapprocher les phénomènes magnéto-cristallins de ceux qui se produisent dans la double *réfraction* de la lumière. Suivant M. Plucker, l'axe des cristaux dits *positifs* tendrait à prendre la direction axiale, et celui des cristaux *négatifs*, la direction équatoriale. Pour les cristaux qui présentent deux axes de double réfraction, ce serait la bissectrice du plus petit des angles que font ces axes, qui suivrait cette loi. M. Faraday admettait deux forces différentes, l'une agissant sur la masse du cristal, l'autre sur son axe. Cette dernière, qu'il nomme force *magné-cristalline*, ne varierait pas, avec la distance, de la même manière que la première.

MM. Tyndall et Knoblauch ont trouvé la véritable explication de ces phénomènes [1]. Ils ont constaté d'abord que beaucoup de cristaux prennent des directions en opposition avec la loi, comme M. Plucker l'avait reconnu lui-même, et que les résultats dépendent plutôt des plans de clivage que des axes de cristallisation. Ils ont ensuite rattaché les phénomènes magnéto-cristallins aux effets ordinaires du magnétisme et du diamagnétisme, en admettant que 1° l'intensité de l'action exercée sur une même substance est d'autant plus prononcée, à égal volume, que ses molécules sont plus rapprochées, et que dans les cristaux, les molécules sont plus serrées dans la direction du plan de clivage que dans la direction perpendiculaire ; 2° *la ligne de plus grande densité est celle suivant laquelle les forces magnétiques s'exercent avec le plus d'énergie.* De sorte que, si la substance est paramagnétique, cette ligne, nommée *ligne de polarité élective*, prend la direction axiale, et si la substance est diamagnétique, cette ligne prend la directionéquatoriale.

Pour mettre en évidence ce principe, MM. Tyndall et Knoblauch l'ont d'abord constaté sur des corps disposés artificiellement de manière à présenter une direction de plus grande densité. Ayant mêlé de la poudre d'oxyde de fer, ou de bismuth, à une pâte faite avec de l'eau et de la gomme, ils en formèrent des barreaux, qui prirent, le premier la direction axiale, et le second la direction équatoriale. Ayant ensuite comprimé ces barreaux de manière à les transformer en disques aplatis, celui qui contenait la substance magnétique prit la direction équatoriale, l'autre se plaça suivant l'axe. C'est que la ligne suivant laquelle les parcelles métalliques sont le plus rapprochées, est perpendiculaire au plan des disques. Un prisme formé de feuilles de papier d'émeri superposées, se dirige de manière que le plan des feuilles soit parallèle à la ligne des pôles de l'électro-aimant, que ce plan soit dirigé suivant la longueur ou suivant la section du prisme. Si l'on réunit de même des feuilles de papier fin non magnétique, sur lesquelles on a fait adhérer de la poudre de bismuth, les feuilles prennent la direction équatoriale. Or, c'est bien suivant le plan de ces feuilles que les parcelles magnétiques ou diamagnétiques sont le plus rapprochées. Des cubes de bismuth comprimés dans un sens, se sont toujours placés de manière que la ligne de compression fût équatoriale. M. Matteucci, qui a répété cette

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXVI, p. 375; et t. XXXVII, p. 76.

expérience, a aussi opéré sur des cubes de soufre et d'acide stéarique, et est arrivé aux mêmes résultats. Des cubes et des barreaux, formés avec des lames trés minces de bismuth, obtenues en laissant tomber le métal fondu goutte à goutte sur un plan de marbre, se sont toujours dirigés de manière que les lames fussent équatoriales.

Les substances à structure fibreuse, chez lesquelles les molécules sont plus rapprochées suivant les fibres que dans la direction transversale, manifestent des effets semblables ; des cylindres d'ivoire, ou de gutta-percha fibreuse, se dirigent de maniére que les fibres soient perpendiculaires à la ligne des pôles de l'aimant, ces corps étant diamagnétiques.

Il n'y a pas jusqu'à l'action de la terre sur certains cristaux qui ne puisse être reproduite par des systèmes artificiels. M. Rieu a formé un prisme rectangulaire au moyen de bandes de papier un peu magnétiqne superposées verticalement suivant la longueur du prisme, et serrées les unes contre les autres par des rubans de soie. Ce système, suspendu par un fil de cocon, se dirige dans le méridien magnétique. Un prisme semblable formé de feuilles perpendiculaires à la longueur du prisme, se dirigea de l'est à l'ouest, de manière que les lames étaient toujours dans le méridien magnétique.

Tous ces faits permettent d'interpréter les phénoménes que présentent les cristaux. Dans les lames que sépare le clivage le plus facile, les molécules sont plus rapprochées que dans le sens perpendiculaire à ces lames. Si donc la substance est magnétique, comme le sulfate de nickel, le béryl, la tourmaline....., le plan de clivage le plus facile prendra la directiou axiale ; si, au contraire, le cristal est diamagnétique, comme les sulfates de magnésie et de zinc, le salpêtre, la topaze....., ce plan prendra la direction équatoriale. S'il y a trois plans de clivage perpendiculaires, comme dans le sel gemme, le cristal ne se dirigera pas. Il en sera de même s'il n'existe pas de plan de clivage, comme dans le cristal de roche. M. Tyndall a reconnu aussi, par la méthode de torsion, que les cristaux attirés ou repoussés par l'un des pôles d'un électro-aimant, le sont plus fortement suivant la direction de plus grande densité que suivant la direction perpendiculaire.

§ 6. APPLICATIONS DE L'ÉLECTRO-MAGNÉTISME.

I. Moteurs électro-magnétiques.

1814. La propriété de l'électro-aimant de recevoir et perdre instantanément une énorme force magnétique, fait de cet appareil un organe mécanique d'un usage de plus en plus fréquent dans les applications industrielles, où il est souvent désigné sous le nom d'*électro*, de même qu'on dit *kilo* pour kilogramme. Une particularité précieuse que présente aussi ce genre de forces, c'est qu'on peut les faire naître, au moyen de fils conducteurs, à des distances

considérables et à l'instant voulu, grâce à la rapidité de propagation de l'électricité. Nous allons terminer ce chapitre en faisant connaître les principales applications de l'électro-magnétisme, et nous commencerons par décrire les appareils moteurs.

*1815. **Moteurs électro-magnétiques.** — L'idée d'appliquer les *électro-aimants* à la production d'un travail mécanique, a dû s'offrir de bonne heure à la pensée des physiciens. Les premiers essais ont été faits presque simultanément en France, en Allemagne, en Italie et en Amérique. Le système tournant de Ritchie (1669) nous présente un premier exemple d'un moteur électro-magnétique. D'après plusieurs physiciens allemands, M. Jedlick aurait imaginé, dès 1829, un appareil rotatif analogue à ceux que nous décrirons plus loin (1816). L'abbé Dal Négro a construit, en 1831, une machine dans laquelle un aimant oscillait entre les pôles d'un électro-aimant, dans lequel le courant était renversé à chaque oscillation.

Les premiers essais suivis et bien authentiques d'un moteur électro-magnétique, ont été faits en 1839, à Saint-Pétersbourg, par M. Jacobi [1]. L'appareil se composait de deux larges disques, l'un fixe, l'autre mobile autour d'un arbre passant par son centre, et portant chacun 4 *électros* en fer à cheval, perpendiculaires à leur plan. Quand les électros du disque mobile se trouvaient assez rapprochés de ceux du disque fixe, ces derniers attiraient les premiers; et au moment où les pôles des deux systèmes se trouvaient en présence, des commutateurs adaptés à l'arbre tournant, renversaient le courant dans les électros mobiles, qui se trouvaient alors repoussés. Quand ces électros arrivaient au milieu de la distance de ceux du disque fixe, l'attraction se manifestait de nouveau, et ainsi de suite. Cette machine, installée sur une chaloupe munie de roues à aubes, portant 12 personnes, put lui faire remonter la Newa, malgré un vent violent. Le courant était fourni par une pile de 128 grands couples de Grove. Le travail mécanique n'atteignit cependant que la valeur de $\frac{3}{4}$ de cheval-vapeur.

Depuis ces essais remarquables, on a parlé de tentatives faites sur une grande échelle au moyen d'appareils puissants, en Amérique, par M. Page, et en Angleterre par M. Davidson qui aurait fait marcher sur le chemin de fer d'Edimbourg à Glascow, une locomotive électro-magnétique faisant 2 lieues à l'heure en remorquant une charge de 6 tonnes. Ces nouvelles expériences ont eu d'abord un grand retentissement, puis on n'en a plus parlé, ce qui porte à croire que les premiers résultats avaient été exagérés, ou que ceux qu'on a obtenus ensuite n'ont pas répondu aux espérances des inventeurs.

Aujourd'hui, au lieu de faire agir des électro-aimants les uns sur les autres, en renversant les courants pour substituer des répulsions aux attractions, on préfère faire agir les électros sur des barreaux de fer doux, qui sont attirés, puis abandonnés à eux-mêmes. On obtient ainsi de meilleurs résultats, sans

[1] *Archives de l'électricité* de M. A de La Rive, t. III, p. 233.

doute parce que le renversement du magnétisme dans les électros ne se fait pas assez rapidement, à cause d'un peu de force coërcitive dans le fer. En outre, si les électros en présence sont de force trop inégale, le plus fort peut donner au plus faible, malgré l'action de l'hélice de ce dernier, un magnétisme contraire, en vertu duquel il y a encore attraction, au lieu de répulsion,

On a imaginé un grand nombre de moteurs de différents modèles. Les principales difficultés qu'il a fallu vaincre proviennent de la diminution rapide de l'attraction quand la distance augmente, et de la détérioration des commutateurs par l'étincelle provenant de l'extrà-courant qui se produit chaque fois que le circuit s'ouvre (1762). Nous allons décrire les appareils qui ont donné les meilleurs résultats, et dans lesquels on est parvenu à lever ces difficultés plus ou moins complètement.

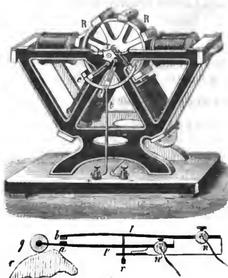


Fig. 1343.

1816. I. MOTEURS A ROTATION DIRECTE. — On doit à M. Froment plusieurs modèles différents de ces sortes de moteurs. La *fig.* 1343 représente une des dispositions les plus élégantes. RR est une roue, dont le contour est garni de huit barreaux en fer doux parallèles à son axe. Quatre électros fixés à un bâti en fonte, agissent sur ces barreaux, qui viennent raser les surfaces polaires, sans cependant les toucher. Un *interrupteur* ou *distributeur*, mis en action par une roue à cames *r*, sert à faire passer le courant d'une pile, dans les électro-aimants, aux moments convenables. Le courant arrive d'abord, par la tige *t*, dans un arc métallique fixe *cc*. Il peut passer de là dans les électros, par l'intermédiaire de trois pièces à galet, dont une se voit à part au bas de la figure. Une de ces pièces correspond aux deux électros inférieurs, et les deux autres aux électros horizontaux. Le courant arrivant dans l'arc *cc*, passe par le bouton *n* dans le ressort *l* fixé à une pièce en ivoire ; puis, par l'intermédiaire des cylindres de platine *a*, *b*, quand ils sont en contact, dans le ressort *l'*, qui communique par le bouton *n'* avec le fil de l'électro-aimant. Le circuit est fermé en *ab* par la roue *r*, dont les quatre cames viennent successivement soulever le galet *g*, adapté à l'extrémité du ressort *l'*. La vis *v* permet de régler l'écart des deux ressorts. Les électros n'agissant avec énergie qu'à

une faible distance, le courant ne doit passer qu'au moment où le barreau se trouve assez rapproché de l'électro-aimant, et être interrompu dès que la distance est minimum. Afin de régulariser l'action, on fait en sorte que les électros agissent les uns après les autres ; pour cela, les barreaux n'arrivent pas à proximité de chacun d'eux au même instant. Enfin, pour atténuer l'effet nuisible de l'extrà-courant et de l'étincelle qu'il produit au moment de la rupture du circuit, le distributeur fonctionne de manière que le courant ne cesse dans un électro-aimant qu'après avoir passé dans l'électro-aimant suivant. L'extrà-courant trouvant ainsi un écoulement facile dans le fil de ce dernier, l'étincelle d'induction est beaucoup plus faible.

1817. Machines dans lesquelles l'action s'exerce jusqu'au contact. — Dans le système qui précède, on est forcé de laisser un petit espace entre les barreaux et les surfaces polaires des électros; or, c'est au contact, que ces derniers agissent le plus fortement. Il résulte des expériences de M. Marié-Davy, que lorsqu'un barreau de fer doux est attiré par un électro, les $\frac{3}{4}$ du travail sont produits dans le dernier millimètre. *p* étant le poids soulevé et *x* la distance, on a $p = \frac{0^k,36}{(x+0,32)^2}$. C'est au moyen de cette formule, intégrée convenablement, que le résultat qui précède a été calculé.

Pour agir jusqu'au contact, plusieurs constructeurs ont eu l'idée de faire rouler sur un cercle en cuivre dont les faces polaires des électros viennent affleurer la surface intérieure, des cylindres en cuivre portant des échancrures remplies par des barreaux de fer. Ces barreaux étant attirés, les cylindres roulent sans glisser, de manière que chaque barreau vient s'appliquer à son tour sur les faces polaires, qui perdent aussitôt leur aimantation. Les cylindres sont adaptés aux extrémités des bras d'une roue dont l'arbre est au centre du cercle de cuivre, et qui tourne nécessairement pendant que les cylindres roulent. MM. Wheatstone, Froment et Marié, ont construit des appareils d'après ce principe. Le dernier a aussi remplacé les barreaux de fer des cylindres par des électros, dont le courant était renversé au moment du contact avec les électros fixes.

Machine de M. Larmenjeat. — La *fig.* 1344 représente un appareil disposé d'une manière différente, et dans lequel l'attraction s'exerce aussi jusqu'au contact. BA est un électro-aimant circulaire, dans le système de M. Nicklès (1673); il porte trois disques en fer doux séparés par les deux hélices magnétisantes *ee*, qui tournent, avec l'électro, autour de l'axe *oo'*. Les disques roulent sur six cylindres aussi en fer doux, dont deux se voient en *r*, *r*. Ces cylindres peuvent tourner autour de tourillons disposés à leurs extrémités, et qui sont engagés dans deux plateaux fixes, dont un se voit de profil en *dd'*, et de face en DD'. Les disques de fer portent six échancrures profondes *c*, *c*.... remplies de cuivre, de manière que le contour est divisé en six parties garnies de cuivre, alternant avec six parties de fer. Quand ces dernières sont assez rapprochées des cylindres *r*, *r*...., le courant passe dans l'électro-aimant, l'attraction s'exerce, le

système BA tourne, et quand le fer attiré se trouve en contact avec le cylindre *r*, le courant cesse dans l'électro. L'arbre *oo'* porte trois électros semblables à BA ; mais les échancrures ne sont pas en face de celles de AB, de manière que les trois électros fonctionnent alternativement. Le distributeur R chargé de faire passer le courant successivement dans les trois électros, consiste en une roue dont le contour présente six parties métalliques alternant avec six parties en ivoire, et sur laquelle s'appuient trois leviers à galets *n*, *n*, *n*, fixés à un cercle concentrique à DD'. Ce cercle, mobile sur lui-même, peut être fixé dans différentes positions, au moyen du levier à vis de pression D, pour régler la position des leviers *n*, *n*, *n*. Le courant partant de la pile P arrive à l'arbre *oo'* par le fil *l*, *l'*, et passe de là, à travers la roue R et l'un des leviers *n*, *n*, *n*,

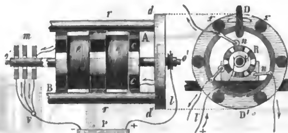


Fig. 1344.

dans l'électro dont le fil communique avec ce levier. Le courant retourne à la pile par le fil F, qui communique par trois ressorts, avec trois roues métalliques isolées *m*, auxquelles aboutissent les fils des trois électros.

1848. II. Moteurs a mouvement alternatif. — La *fig.* 1345 représente un appareil oscillant construit par M. Bourbouze, d'après un système imaginé par M. Breton. *a*, *a'* sont deux paires d'hélices magnétisantes ; une de ces paires est représentée de face en *cc'*, à droite de la figure, où l'on voit aussi la coupe intérieure d'une des hélices. Dans chaque hélice se trouve un barreau fixe en fer doux *i*, qui n'en occupe que la moitié de la hauteur. D'autres barreaux *c*, *c'*, C, C', articulés à l'extrémité d'un balancier BOB' peuvent s'enfoncer plus ou moins dans les hélices. Quand un courant passe dans la paire d'hélices *a*, les barreaux de fer fixes et mobiles sont aimantés dans le même sens et s'attirent mutuellement, et les barreaux mobiles C s'enfoncent dans les hélices. Quand la distance est minimum, le courant est interrompu en *a* et est lancé dans les hélices *a'*, où les barreaux C' s'enfoncent à leur tour en faisant remonter les barreaux C. Le balancier prend ainsi un mouvement d'oscillation qui est transmis à un volant par l'intermédiaire de la bielle *b* et de la manivelle *m*. Le distributeur, représenté en *oα'*, est conduit, à la manière du tiroir d'une machine

à vapeur, par un excentrique *e* adapté à l'arbre du volant. La plaque *oo*, en ivoire, porte en son milieu une lame métallique *r* sur laquelle s'appuie un ressort communiquant avec le pôle positif de la pile. Des ressorts *α*, *α'*, fixés, l'un au fil des hélices *a*, l'autre au fil des hélices *a'*, s'appuient sur la plaque *oo*. Quand cette plaque est tirée vers la gauche, comme dans la figure, le courant passe de la lame métallique *r* dans le ressort *α*, et le courant est interrompu en *a'*, le ressort *α'* s'appuyant alors sur l'ivoire. Quand ensuite la plaque *oo* est poussée vers la droite, par l'excentrique *e*, la lame *r* s'engage sous le ressort *α'*, et le courant passe en *a'*, en même temps qu'il est interrompu en *a*.

La course des cylindres mobiles devant être très petite, parce que les attractions ne se font sentir vivement qu'à une petite distance, le balancier se prolonge en BA, pour que la manivelle *m* puisse avoir une longueur suffisante.

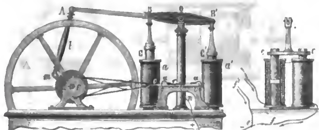


Fig. 1345.

Remarquons aussi que les courants qui enveloppent les cylindres mobiles agissent aussi pour les faire enfoncer (1674).

L'action des hélices pour déplacer des cylindres de fer dans leur intérieur, a été employée seule par M. du Moncel, pour produire un mouvement alternatif à grande course. Deux bobines placées sur le prolongement l'une de l'autre, renferment un cylindre de fer doux. Le courant passant successivement dans les deux bobines, ce cylindre est transporté de l'une dans l'autre, son milieu tendant à venir se placer dans la section moyenne de l'hélice en activité. M. Fessel a construit une machine d'après le même principe. — L'appareil avec lequel M. Page a fait ses expériences, en Amérique, était aussi construit sur ce principe; le cylindre électro-dynamique était composé d'une série d'hélices courtes, mises en activité successivement, de manière que la course fût de $0^m,66$.

Appareil de M. Roux. — Cet appareil, qui a beaucoup excité l'attention, à l'Exposition universelle de Paris, présente une disposition originale, au moyen de laquelle le fer doux ne s'éloigne que peu de la surface polaire qui

l'attire, tout en prenant un mouvement d'oscillation d'amplitude relativement considérable. E (*fig.* 1346) est un électro-aimant trifurqué (1673), dont les surfaces polaires sont horizontales et tournées vers le haut. Au-dessus, est suspendue, par des leviers articulés *l*, *l*, une large plaque de fer doux *ab*, qui, s'abaissant quand elle est attirée, s'avance en même temps horizontalement, de manière à amener les leviers *l*, *l* dans la position verticale. Cette plaque *ab* agit, par l'intermédiaire de la bielle B, sur la manivelle *m* adaptée à l'arbre d'un volant. Quand la plaque *ab* est abaissée, une autre plaque *a'b'*, disposée comme *ab* et dépendant d'un autre électro E', se trouve soulevée et repoussée vers la droite par la manivelle *m'* qu'elle commande. En cet instant, le courant est supprimé en E et dirigé dans E', la plaque *a'b'* s'abaisse, et la plaque *ab* est soulevée et tirée vers l'arbre tournant, par la manivelle *m*; et ainsi de

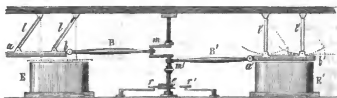


Fig. 1346.

suite. Pour faire passer le courant alternativement dans les électros E et E', l'arbre porte un excentrique métallique *e*, qui communique avec l'un des électrodes de la pile et va presser alternativement des galets *r*, *r'* montés sur des ressorts qui communiquent avec le fil des électros. Les centres polaires développés sur les plaques *ab*, *a'b'* changeant de place pendant leur mouvement, il faut que ces plaques soient en fer bien doux.

1819. Du travail des moteurs électriques. — La puissance des moteurs électro-magnétiques dépend, pour un même modèle, du nombre et des dimensions des couples de la pile, et de la puissance des électro-aimants. Or, cette puissance est proportionnelle à l'intensité du courant qui les anime, mais seulement jusqu'à une certaine limite, d'autant plus éloignée que le barreau de fer présente une plus grande section (1670). Il faut donc, pour qu'il y ait avantage à employer des courants intenses, que le fer doux des électros soit très gros.

Maximum de travail. — Une remarque importante, c'est que les électros n'agissent pas, pendant le mouvement de l'appareil, avec la même énergie que pendant le repos. M. Jacobi, qui a fait, lors de ses essais (1815), une étude approfondie des conditions des moteurs électriques, a constaté que le courant qui anime les électros s'affaiblit notablement pendant la marche de l'appareil.

L'extrà-courant qui se manifeste aux instants où le circuit se ferme (1762) concourt à ce résultat; mais l'effet est dû surtout aux courants induits inverses que produit dans les hélices, le rapprochement des barreaux mobiles qu'attire l'électro, et qui sont aimantés par influence. Ces courants induits, d'autant plus intenses que le mouvement est plus rapide, neutralisent en partie le courant de la pile. C'est, du reste, ce que l'on prouve directement en faisant passer le courant de la pile à travers une boussole des sinus; on voit la déviation diminuer pendant la marche, et la diminution augmenter avec la vitesse.

Il résulte de là que le *travail* du moteur n'est pas proportionnel à sa vitesse, à cause de l'affaiblissement de la force des électros par le fait même de l'accroissement de vitesse. M. Jacobi a trouvé par le calcul, en s'appuyant sur les lois de Ohm et sur celles des courants d'induction, que le maximum de travail a lieu quand la vitesse est telle, que l'intensité du courant de la pile est réduite *à la moitié* de la valeur qu'elle possède quand l'appareil est en repos; et cela a lieu, quel que soit le nombre de spires des hélices, pourvu que la résistance totale du circuit reste la même. Dans chaque cas, la valeur absolue du travail maximum dépend de la disposition de l'appareil, de la manière dont il utilise la force des électros, et de la force électromotrice de la pile. C'est ainsi que, d'après M. Jacobi, le travail fourni par une pile de Daniell étant représenté par 1, celui que fournit une pile de Grove, *pour la même quantité de zinc dissous*, est représenté par 1,75. Du reste, le rapport entre le travail utile et le zinc dépensé reste le même, quel que soit le système de couple employé. Il est important de remarquer aussi, que si le courant de la pile est affaibli par les courants induits, la dépense du zinc dans les couples est diminuée dans le même rapport.

1820. Comparaison du travail des moteurs électriques et à vapeur. — M. E. Becquerel a fait en 1855 des expériences comparatives, sur le travail fourni par quatre des moteurs électriques figurant à l'Exposition universelle de Paris : la machine de M. Larmenjeat, celle de M. Roux, décrites ci-dessus; un appareil de M. Loiseau, analogue à la machine de Jacobi, et un moteur oscillant exposé par MM. Fabre et Kunemann. Le travail était mesuré par le frein dynamométrique, et la quantité de zinc dissous dans chaque couple était évaluée au moyen d'un voltamètre à sulfate de cuivre placé dans le circuit (1566). Les appareils de M. Larmenjeat et de M. Roux ont donné les meilleurs résultats ; mais ces résultats dépendent, et suivant des lois différentes pour les deux appareils, du nombre des couples, de leur disposition et de la manière dont ils sont réunis, soit en série, soit en quantité; ils sont consignés dans le tableau suivant. La pile était formée de couples à charbon, à zinc intérieur présentant une surface de 0,85 décimètres carrés. Dans deux expériences, le zinc était extérieur et présentait 2,625 décimètres carrés.

	NOMBRE DE COUPLES.	TRAVAIL DU MOTEUR		ZINC DISSOUS PAR HEURE ET	
		sans voltamètre.	avec voltamètre.	par kilogrammèt.	par cheval.
		kilogrammètres.	kilogrammètres.	grammes.	kilogrammes.
Appareil rotatif de M. Larmenjeat.	20 couples simples.	0,836	0,720	160	12,000
	10 doubles.......	»	0,484	203	15,200
	10 triples........	1,028	0,900	60	4,500
	10 quadruples....	1,280	0,960	61	4,575
Appareil oscillant de M. Roux.	10 triples........	0,829	0,562	174	13,050
	10 simples.......	»	0,450	142	10,680
	10 doubles.......	1,052	0,584	144	10,800
	10 triples........	1,550	0,850	132	9,900
	10 quadruples....	3,660	1,500	88,7	6,640
	8, zinc extérieur .	1,600	1,330	44,0	3,300
	6, id.......	0,600	0,415	28,9	2,200

On obtenait des couples doubles, triples..., en réunissant 2, 3... couples égaux. On voit que la dépense de zinc par cheval, dépend du nombre des couples et de la manière dont ils sont réunis, et que, généralement, il y a avantage à donner une grande surface au zinc. La machine rotative a donné le minimum de dépense de zinc, avec 10 couples triples, savoir : 4k,5 de zinc par heure et par cheval ; le cheval équivalant à 75km par seconde. La machine de M. Roux a dépensé, avec la même pile, en moyenne 6k,6 ; mais avec des couples dont le zinc avait 2,62 de surface au lieu de 0,85, la dépense s'est abaissée à 2k,2. Les fils des électros étaient gros, et leur résistance n'exigeait pas une grande tension électrique. En adoptant le nombre de 2k,2 par cheval et par heure, et prenant pour prix du kilo de zinc le chiffre 0f,70, on trouve 1f,52 pour prix du cheval par heure, en ne tenant pas compte du prix des acides et de la dépense d'entretien de la pile. Or, le travail d'un cheval fourni par une machine à vapeur, n'exige que de 3 à 4 kil. de houille par heure, et même que 1k,5 avec les machines perfectionnées (1005). La houille ne coûtant, à Paris, que 5 centimes le kil., on voit que le cheval-vapeur ne dépense que pour 15,20 ou 7,5 centimes par heure ; c'est-à-dire, avec cette dernière évaluation, une somme vingt fois plus petite que le prix du zinc dans le moteur électrique qui a donné les meilleurs résultats. Il est vrai d'ajouter que, dans les expériences faites avec ces derniers appareils, on ne paraît pas s'être préoccupé de les faire marcher avec la vitesse correspondante au maximum de travail. Ces moteurs n'avaient guère que la force de $\frac{1}{8}$ d'homme. M. Froment a

construit une machine à rotation directe de la force d'un cheval, et qui dépense $1^{f},60$ par heure et par cheval.

MM. Joule et Scoresby ont établi une comparaison entre le travail des moteurs électriques et celui des machines à vapeur, en s'appuyant sur la théorie de l'équivalent mécanique de la chaleur, et admettant que la partie de la chaleur développée dans un couple, qui ne se manifeste pas en effets calorifiques, se transforme en travail mécanique [1]. Soit I l'intensité du courant quand la machine est en repos, et i cette intensité pendant la marche ; les quantités de chaleur produites sont proportionnelles aux carrés de ces intensités ou à I^2 et i^2 (1526). De plus, avec l'intensité i du courant, il y a un travail mécanique développé x ; de sorte que le travail total, tant calorifique que mécanique, est, pendant le mouvement, égal à i^2+x. Admettant comme évident que les quantités I^2 et i^2+x sont proportionnelles aux intensités, I et i, ou aux quantités de zinc dissous qui leur correspondent, on a $i^2+x : I^2 = i : I$; d'où l'on tire, en multipliant les deux derniers termes par i et *componendo*, $x : i^2+x = I - i : I$. Or, le premier rapport n'est autre chose que le rapport entre le travail mécanique et l'effet total tant mécanique que calorifique. D'après M. Joule, 1 grain de zinc dissous produit une quantité de chaleur équivalente à 52 kilogrammètres. Remplaçant i^2+x par ce nombre, on tire $x = 52^{km}\frac{I-i}{I}$.

Des expériences, faites avec un moteur à rotation directe, ont donné à MM. Joule et Scoresby un travail moyen de 22^{km} par grain de zinc dissous ; tandis que le travail théorique calculé avec la formule, est de 26^{km}. Le travail effectif n'a donc été, avec leurs appareils, que les $\frac{4}{5}$ environ du travail théorique. Les mêmes physiciens ont calculé ensuite que 1 grain de houille produit en brûlant une quantité de chaleur équivalente à 445^{km}. Admettant qu'une machine à vapeur n'utilise que le dixième de la chaleur de la combustion, ou ne produit que $44,5^{km}$ par grain de houille, elle donnera le double du travail du moteur électrique qui a servi aux expériences ; et comme le zinc coûte à peu près 14 fois plus que la houille, on voit que, d'après ces nouvelles évaluations, le travail du moteur électrique employé, serait 28 fois plus coûteux que celui des machines à vapeur avant les derniers perfectionnements.

1824. Remarque. — Il résulte de tout ce qui précède, que les machines à vapeur présentent, au point de vue de l'économie, une grande supériorité sur les moteurs électriques. L'espérance, souvent émise, de remplacer la vapeur par l'électricité, n'est donc pas fondée pour le moment, et ne pourra l'être que si l'on découvre un moyen de produire de l'électricité, beaucoup moins coûteux que ceux que l'on connaît aujourd'hui. Si nous ajoutons que l'on n'a pu jusqu'à présent atteindre qu'à peine à la force d'un cheval, et que

[1] *Bibliothèque universelle de Genève* (Arch. des sc.), t. III, p. 36.

les machines pesaient alors plus de 800 kil., on est effrayé du poids que devrait avoir un appareil seulement de 100 chevaux, en supposant qu'on puisse jamais obtenir une semblable puissance au moyen de l'électricité. Mais ce n'est pas à dire pour cela que les moteurs électro-magnétiques ne puissent être utiles dans certains cas. Par exemple, quand on n'a besoin que de petites forces et de très grandes vitesses, ils sont bien supérieurs aux moteurs à vapeur. La régularité de leur mouvement, la facilité de les mettre en marche et de les arrêter instantanément, la possibilité de les faire marcher à une grande distance du lieu où l'on est, les rend précieux dans certaines circonstances. M. Froment s'en sert, à l'occasion, pour faire mouvoir des tours dans ses ateliers. Il en emploie aussi à faire marcher des machines à diviser qui tracent jusqu'à 1000 traits dans un millimètre. Ces appareils sont tellement délicats, qu'ils ne peuvent fonctionner régulièrement que pendant la nuit, quand les rues ne sont plus parcourues par les voitures ; une horloge est chargée de faire partir une détente qui ferme le courant de la pile à l'heure convenable.

II. Télégraphes électriques.

1822. Historique. — Dés qu'on eut remarqué la grande vitesse de propagation de l'électricité, on songea à tirer parti de cet agent pour transmettre des signaux. Franklin paraît avoir conçu le premier cette idée, sans qu'il l'ait cependant précisément formulée. Du reste, les propriétés de l'électricité étaient trop peu connues de son temps, pour que cette application fût praticable. Vers la même époque, la télégraphie ordinaire commençait à sortir de l'enfance. Aux feux que, dans l'antiquité la plus reculée, on allumait sur les hauteurs pour correspondre en temps de guerre, aux pavillons que les marins emploient depuis un temps immémorial pour communiquer à de grandes distances, Amontons, profitant de l'invention alors récente du télescope, proposa de substituer des signaux faits au moyen de leviers articulés. Il imagina de transmettre ces signaux entre plusieurs stations établies de distance en distance, comme cela avait, du reste, déjà été fait au IIIe siècle avant notre ère, par Philippe V père de Persée, au moyen d'un système de fanaux. Plus tard vinrent les essais de l'abbé Chappe, auquel on doit l'établissement des télégraphes aériens adoptés en 1793 par la Convention nationale, et l'invention du système de signaux qui a été en usage jusqu'au milieu du siècle actuel. Pendant ce temps-là, les essais de télégraphie électrique se poursuivaient laborieusement, faisant un pas de plus à chaque découverte capitale en électricité. La première expérience fut faite à Genève, en 1774, par Lesage, au moyen de 24 fils métalliques correspondants aux lettres de l'alphabet. Ces fils étaient noyés dans de la résine contenue dans une auge en bois, et chacun d'eux portait à l'une de ses extrémités, un électroscope à balle de sureau. On faisait communiquer

l'extrémité opposée, avec une machine électrique, et l'électroscope indiquait le fil électrisé, et, par conséquent, la lettre qu'on avait voulu désigner. Ce système fut appliqué, en 1797, entre Madrid et Aranjuez, par M. de Bétancourt; seulement, l'électricité était lancée dans les fils, au moyen d'une bouteille de Leyde. La même année, un physicien français, Lomond, installa dans ses appartements, un appareil analogue, qui excita l'admiration d'Arthur Young. En 1794, Reiser désignait des lettres métalliques fixées à un plateau de verre et communiquant avec le sol, au moyen d'étincelles électriques provoquées par les extrémités arrondies des fils métalliques. Le docteur Salva construisit, en Espagne, un télégraphe semblable avec lequel une nouvelle put être transmise à une grande distance, à l'infant don Antonio.

La pile n'était pas alors connue. Onze ans après la découverte de Volta, Sœmmering, à Munich, employa la décomposition de l'eau pour faire des signaux : 36 fils métalliques isolés étaient tendus entre les deux stations. Des aiguilles en or soudées à l'extrémité de chacun d'eux, plongeaient dans une auge pleine d'eau acidulée. Un des fils était mis en communication par son extrémité opposée, avec le pôle positif d'une pile, et un autre fil, avec le pôle négatif. L'aiguille d'or du premier laissait dégager un petit nuage de bulles d'oxygène, et l'aiguille du second, un nuage plus abondant de bulles d'hydrogène, de manière à désigner deux fils, et par conséquent deux signes à la fois. Déjà, dans ce système, l'emploi de l'électricité dynamique rendait facile l'isolement des fils, et levait ainsi une difficulté insurmontable pour les grandes distances, avec l'électricité statique. Dans l'appareil de Sœmmering, auquel M. Schweger avait apporté divers perfectionnements, on remarquait un *avertisseur*, destiné à appeler l'attention de celui qui devait recevoir les signaux : le gaz hydrogène dégagé sur un des fils, se rendait dans une petite cloche suspendue à un levier horizontal en équilibre, dans le bras opposé duquel était engagé un anneau. Le gaz soulevait la cloche, et l'anneau, glissant sur le levier, tombait dans un bassin de métal en produisant un bruit retentissant.

En 1820 eut lieu la découverte d'Œrsted, Aussitôt Ampère vit le parti qu'on en pouvait tirer pour faire des signaux; mais cette idée ne pouvait être utilisée qu'après l'invention du *multiplicateur*, et ce ne fut que 13 ans après, que Schilling l'appliqua sur une petite échelle, à St-Pétersbourg. Cinq fils de platine, renfermés dans un câble en soie, communiquaient par une de leurs extrémités avec un multiplicateur, et aboutissaient par l'autre, à un clavier semblable à celui d'un piano. On lançait le courant d'une pile, dans un de ces fils, en abaissant la touche qui lui correspondait. Suivant le sens du courant, l'aiguille était déviée d'un côté ou de l'autre; ce qui formait, avec les 5 aiguilles, 10 signes différents. MM. Ritchie et Alexander construisirent, en 1837, à Edimbourg, un appareil semblable. Il y avait 30 fils tendus entre les deux stations, et 30 aiguilles formant le même nombre de signes. MM. Gauss et Weber employèrent aussi ce genre d'appareil, pour faire communiquer le cabinet de physique et l'observatoire de Gœttingue.

revenu à la pointe d'acier. M. John a levé la difficulté en armant le style, d'une petite molette plongeant dans l'encre par sa partie inférieure et s'appuyant sur le papier, qui doit être courbé à angle assez aigu. Avec ce système, l'effort à faire est assez faible pour qu'on n'ait plus besoin de relai. M. Froment a employé un crayon, et rendu les signes plus rapides, au moyen de l'appareil suivant.

1836. Télégraphe de M. Froment. — Dans le *récepteur* de M. Froment, les signes sont tracés par un crayon incliné sur le papier et tournant sur lui-même, de manière que la pointe s'usant également tout autour, reste toujours taillée. Le levier écrivant L (*fig.* 1362) oscille dans un plan horizontal, autour de l'axe *oo*, sous l'influence de l'électro-aimant E, et du ressort de rappel *s*. Le crayon oblique *c*, poussé par un léger ressort, porte une petite roue *r*, dont les dents obliques viennent, à chaque oscillation du levier, rencontrer un heurtoir *n* qui force la roue et le crayon à tourner légèrement sur eux-mêmes.

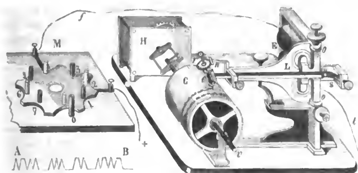


Fig. 1362.

Le crayon s'appuie sur un cylindre C, garni d'une feuille de papier. Une horloge H, fait tourner ce cylindre, qui se déplace en même temps dans le sens de son axe, au moyen d'un pas de vis *v*, qui s'engage dans un demi-écrou que porte l'un des supports du cylindre, de sorte que le crayon tracerait une hélice s'il était en repos. Mais comme le levier L oscille, le crayon, dans ses mouvements combinés avec la rotation du cylindre, trace des zig-zag, dont on voit un spécimen en AB. En faisant varier le nombre des traits obliques contigus, et les combinant de différentes manières en laissant de petits intervalles de repos, on pourra former un grand nombre de signes, que l'on séparera par des intervalles de repos plus longs. Dans les premiers appareils de M. Froment, le papier était un ruban passant sur des rouleaux. C'est Dujardin qui a imaginé d'appliquer la feuille de papier sur un cylindre ayant le double mouvement, de manière que, développée, elle présente les signes, disposés en séries parallèles.

Manipulateur. — Pour lancer le courant de manière à former avec rapidité les nombres voulus de traits en zig-zag, M. Froment emploie le manipula-

teur M (*fig.* 1362). Un plateau, fixé au-dessus d'une roue à interruption présentant quatre parties métalliques séparées par quatre parties d'ivoire, porte huit chevilles équidistantes, dont quatre, en ivoire, correspondent aux parties d'ivoire de la roue, et quatre, en bois, aux parties métalliques. Veut-on produire trois traits en zig-zag, on prend la troisième cheville à partir d'un repère fixe, *o*, et on l'amène devant ce repère. Pendant ce mouvement, le courant a été établi, interrompu, puis rétabli ; ce qui a fait faire trois demi-oscillations au levier L. Si l'on veut combiner les trois traits formés, avec cinq autres, on saisira immédiatement la cinquième cheville, et on l'amènera en face du repère. Pendant le temps que met la main à aller de la cheville qu'elle quitte à celle qu'elle vient prendre, le levier reste un instant en repos, et le crayon trace une petite ligne droite qui sert à séparer les deux systèmes de traits. Pour qu'on n'ait pas besoin de compter les chevilles, on a gravé sur la table, autour du plateau, des chiffres fixes allant en croissant, à partir du repére, en sens contraire du mouvement du plateau.

Les signes sont combinés de manière que les séparations des groupes de traits obliques qui représentent les lettres soient toutes d'un côté, tandis que les séparations plus courtes qui séparent les groupes formant une même lettre sont toutes du côté opposé. Les premières se font toujours pendant la suppression du courant, c'est-à-dire quand une cheville d'ivoire est arrêtée devant le repère ; les plus courtes ont lieu, par conséquent, pendant le passage du courant, ou quand une cheville de bois se trouve au repère. Il sera donc facile d'éviter et de reconnaître les erreurs.

1837. Télégraphes électro-chimiques enregistreurs. — Avant la découverte d'Œrsted, Sœmmering avait employé les actions électro-chimiques pour produire des signaux (1822). Plus tard, en 1839, E. Davy construisit un télégraphe écrivant des signes au moyen de la décomposition de l'iodure de potassium. Mais cet appareil, très compliqué, exigeait trois fils de communication. M. Bain ayant repris la question, a imaginé l'appareil suivant. Un plateau circulaire en métal, sur lequel est appliquée une feuille de papier humide imprégnée d'une dissolution de cyanure de potassium, tourne sur lui-même. Un style en acier constamment appuyé sur le papier, reçoit l'électricité *positive* de la pile placée à la station opposée, pendant que le plateau reçoit le fluide négatif. Quand le courant passe, il traverse le papier humide et décompose le sel ; le cyanogène se porte sur le style et se combine avec le fer, en donnant naissance à du bleu de prusse, qui forme des points ou des traits, suivant la durée du passage du courant. Le style est porté par un bras à vis qui s'allonge peu à peu par l'influence du moteur du plateau, de manière que le style trace une spirale, sur laquelle sont distribués les signes. On voit que l'appareil est très simple ; il n'y a plus d'électro-aimant, et le style reste toujours appuyé sur le papier.

M. Pouget-Maisonneuve a perfectionné cet appareil en faisant passer un ruban de papier entre deux cylindres, comme dans le télégraphe de Morse :

le cylindre sur lequel s'appuie le style est en métal, et communique avec le pôle négatif de la pile. Le papier est imbibé d'une dissolution renfermant 5 parties de cyanure de potassium et 150 d'azotate d'ammoniaque ; ce dernier sel est destiné à attirer l'humidité de l'air.

Manipulateur. — Au lieu de se servir du *levier-clef* de Morse (1832), M. Bain emploie une disposition ingénieuse qui peut s'appliquer aux autres télégraphes enregistreurs. Il écrit d'avance la dépêche sur un ruban de papier, au moyen d'un emporte-pièce formant des traits et des points à jour, disposés suivant une ligne droite, dans l'ordre convenable. Pour faire cela rapidement, il se sert d'une petite machine, dans laquelle le ruban de papier marche rapidement. L'emporte-pièce étant abaissé une fois, forme un point ; si on l'abaisse deux ou trois fois rapidement, le point s'allonge et devient un trait. Le ruban, ainsi préparé, est engagé dans le manipulateur ; il passe sur un cylindre métallique tournant, qui communique avec l'un des pôles de la pile. Une pointe émoussée s'appuie sur le cylindre et en est séparée par le papier, de manière que le courant est interrompu ; mais quand un point ou un trait passe sous la pointe, celle-ci vient toucher la surface du cylindre, et le circuit est fermé momentanément. Avec cet artifice et en se servant de son plateau tournant, M. Bain pouvait enregistrer jusqu'à 1,500 traits ou points par minute.

Le télégraphe électro-chimique exige l'emploi d'un relai. Il est en usage en Amérique, en Angleterre. On s'en sert particulièrement pour transmettre les discours, les longs récits, à cause de la rapidité des signes. Mais on lui préfère d'autres systèmes, pour les cas ordinaires, à cause du soin de préparer le papier chimique et de la nécessité de le conserver humide.

1838. Télégraphes autographiques. — Les télégraphes électro-chimiques ont conduit à l'invention des télégraphes *autographiques*, c'est-à-dire qui reproduisent le *fac-simile* d'une écriture ou d'un dessin tracés à la plume. M. Blackwell a, le premier, obtenu ce résultat, en 1849. Plus tard, M. Caselli a publié, sous le nom de télégraphe *pantographique*, un appareil perfectionné qui atteint le même but, mais dont il n'a pas encore donné de description complète. Voici quel est le principe de l'appareil de M. Blackwell. Imaginons, à chacune des stations, un cylindre métallique tournant, sur lequel s'appuie un style en acier ayant un mouvement continuel de va et vient suivant les arêtes du cylindre ; mouvement produit par le système d'horlogerie qui fait tourner le cylindre. Les mouvements des styles des deux stations sont synchrones ; ce que l'on obtient au moyen d'électro-aimants qui, sous l'influence d'un même courant, font mouvoir aux mêmes instants un échappement qui règle la vitesse d'une roue dentée. Sur le cylindre qui doit recevoir le *fac-simile*, est appliquée une feuille de papier imbibée de cyanure de potassium ; de manière que si un courant venant de la station opposée, passe du style dans le cylindre, ce style trace sur le papier une série de hachures bleues à peu près parallèles aux arêtes du cylindre. La dépêche est écrite avec une encre isolante, sur du papier

d'étain que l'on applique sur le cylindre transmetteur. Ce cylindre est en relation avec un des pôles d'une pile, et le style qui va et vient sur sa surface écrite communique avec le fil de ligne. Le courant est interrompu toutes les fois que le style porte sur un trait à l'encre, et en ce moment la ligne bleue tracée par le style de la station opposée est interrompue par un espace blanc de longueur égale à l'épaisseur du trait à l'encre. On conçoit, d'après cela, que le *fac-simile* sera reproduit par des points blancs *réservés* sur un fond de hachures bleues, et ces points seront d'autant plus rapprochés sur un même trait du dessin que les hachures seront elles-mêmes plus serrées, c'est-à-dire que le mouvement des cylindres sera plus lent par rapport à celui des styles.

M. de Lucy-Fossarieu a trouvé, dernièrement, moyen de se passer de papier chimique, en remplaçant le style par un bec garni d'encre, constamment soulevé par un petit électro-aimant quand passe le courant, et retombant sur le papier

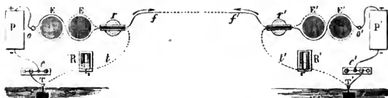


Fig. 1363.

pendant que ce courant est interrompu par les caractères écrits sur la surface métallique du transmetteur. — Ajoutons enfin, qu'on a imaginé des télégraphes autographiques dans lesquels un crayon trace directement les caractères de la dépêche ; mais ils attendent de nombreux perfectionnements avant de pouvoir être utilisés avec avantage.

1839. Transmission simultanée et en sens inverse, des dépêches dans un même fil. — Sur les lignes qui sont surchargées de dépêches, il est important, pour économiser le temps, de pouvoir faire passer des signaux simultanément en sens contraire. On obtient ce résultat en employant deux fils de ligne affectés chacun à la transmission dans un seul sens ; mais on a cherché à y arriver au moyen d'un seul fil. Ce problème, qui semble au premier abord insoluble, a été résolu par M. Gintl, en 1853, puis par MM. Siemens, Halske, Edlund, Wartmann. Pour arriver au résultat, il suffit de pouvoir faire fonctionner simultanément les relais placés aux deux stations (1833).

La *fig.* 1363 donnera une idée du principe commun adopté par les divers inventeurs. Les deux stations sont disposées de la même manière, et les mêmes lettres sont attribuées aux mêmes objets. EE est l'électro-aimant du relai, P la pile principale. Le fil positif se bifurque en *o*, et ses deux moitiés, parfaitement égales, s'enroulent en sens contraire autour de l'électro-aimant en faisant le même nombre de tours, puis passent par un *réomètre différentiel* *r*. Les deux

branches se séparent ensuite ; l'une forme le fil de ligne *f*, et l'autre représentée en ligne ponctuée *t*, communique avec le sol en T, après avoir passé par un *réostat* R. Le fil négatif de la pile vient en *c*, où se trouve un *levier-clef* au moyen duquel on peut le faire communiquer avec le sol, ou interrompre la communication. On commence par régler le réostat R de manière que les deux courants qui partent du point *o* soient de même intensité, ce qu'indique le réomètre *r*; alors l'électro-aimant qu'ils parcourent en sens contraire est à l'état neutre. Cela posé, si l'on fait jouer la clef *c*, le courant de la pile P, qui ne produit aucun effet en EE, fera fonctionner le relai E′E′ de la station opposée; car le fil *f′* communique avec le sol par le point de jonction *o′* et le fil *t′*T′ ; et, de plus, ce courant aimante l'électro-aimant E′E′, car il passe en *o* de l'une à l'autre des deux parties de fil enroulées en sens contraire. Si en même temps un courant est lancé de la pile P′ dans le relai EE, on voit que ce dernier fonctionnera; puisqu'il y aura autour de l'électro-aimant EE, indépendamment des courants contraires venant de P, le courant arrivant de P′, qui rompra l'équilibre magnétique.

1840. De quelques autres systèmes de télégraphes électriques. — Nous avons vu qu'on a employé, pour faire des signaux télégraphiques, les répulsions électriques, l'étincelle, la décomposition de l'eau, l'électro-magnétisme, et enfin la décomposition de certains sels. Il nous reste, pour compléter cette énumération, à dire un mot de quelques autres systèmes. Nous citerons d'abord, à cause de sa singularité, celui qu'a proposé, en 1839, M. Worselman de Heer. Partant de ce principe que les actions physiologiques se manifestent à une plus grande distance que les actions physiques et chimiques, il dispose un clavier de 10 touches en métal sur lesquelles on appuie les 10 doigts des mains, et une commotion excitée dans un des doigts par l'électricité partie de la station opposée, indique le signe auquel correspond la touche sur laquelle ce doigt est posé. On ne peut s'empêcher d'être frappé d'une vive surprise en éprouvant ainsi une sensation provoquée par un correspondant placé à une immense distance ; il semble qu'on a communiqué avec lui directement par le toucher. Pour avertir ou réveiller le stationnaire, l'inventeur proposait de lui faire porter une ceinture en partie métallique, par l'intermédiaire de laquelle il devait recevoir une commotion assez forte pour appeler vivement son attention.

M. Stenheil a imaginé de produire des signaux au moyen de sons. Il faisait frapper les deux aimants de son télégraphe enregistreur (1822), sur deux timbres rendant des sons différents, et il réalisait ainsi le premier *télégraphe auditif*. M. Mirand a appliqué sa sonnerie (1824) au même usage ; en pressant un bouton, on ferme le circuit, et l'appareil sonne. Si l'on n'appuie le doigt que pendant un temps très court, on n'a qu'un simple coup de marteau sur le timbre; si l'on maintient la pression pendant un peu plus de temps, on obtient un roulement. En combinant des coups simples avec des roulements, on peut produire toutes sortes de signes, comme dans le télégraphe de Morse en

combinant des points et des traits. M. Mirand a appliqué avec succès ce système télégraphique aux grands établissements, hôtels, bains publics, manufactures, etc., où il remplace avec avantage les sonnettes et autres moyens d'avertissement, et se prête à une multitude de modes variés de communication.

On a aussi construit beaucoup de systèmes de télégraphes imprimant les dépêches en caractères ordinaires. Ce sont des appareils généralement lents et compliqués. Cependant divers inventeurs s'appliquent avec ardeur à les perfectionner, et déjà l'on est parvenu à les simplifier d'une manière remarquable. Il faudrait des volumes pour décrire les divers systèmes télégraphiques qu'on a imaginés et qu'on imagine tous les jours [1]. On s'attache particulièrement aujourd'hui à augmenter la rapidité de formation des signes, la plupart des lignes télégraphiques ne pouvant fournir à la transmission des dépêches qui leur sont confiées.

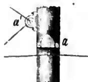


Fig. 1364.



Fig. 1365.



Fig. 1366.



Fig. 1367.

1841. DES SYSTÈMES DE TRANSMISSION. — Il nous reste à parler des divers circuits au moyen desquels on fait communiquer les postes télégraphiques. On emploie trois systèmes différents : *fils aériens*, *fils souterrains*, et *fils sous-marins*.

Fils aériens. — Les fils aériens sont le plus généralement employés ; on les a faits d'abord en cuivre, métal le meilleur conducteur ; mais le haut prix de cette substance a fait préférer les fils de fer, quoiqu'ils conduisent environ 7 fois moins. Pour compenser, on leur donne une grande section. En France et en Angleterre, on se sert de fils de fer de 4^{mm} de diamètre galvanisés, pour les préserver de l'oxydation (1591). Ces fils sont soutenus, à des distances qui varient de 20 à 50 mètres, et à des hauteurs de 6 à 10 mètres, par des poteaux en bois de pin, injectés, pour qu'ils se conservent plus longtemps, avec du sulfate de cuivre ou du pyrolignite de fer, par le procédé de M. Boucherie. Pour que les fils soient isolés, on les suspend à des pièces de porcelaine, de verre ou de faïence fixées aux poteaux. En France, on se sert d'espèces de cloches en porcelaine vernie, sous lesquelles est scellé au soufre, un crochet de fer qui se trouve ainsi à l'abri de la pluie, et dans lequel passe le fil, *a* (*fig.* 1364). Aux endroits où le fil doit changer de direction, on le fait passer

[1] V. *Exposé des appl. de l'élect.*, et *Revue des appl. de l'élect.* (1859), par M. Du Moncel.

dans des anneaux en porcelaine *a'*, portant une embase par laquelle on les fixe au poteau. En Angleterre, on dispose souvent, à travers les poteaux, des tubes en faïence que traversent les fils; d'autres fois, ces tubes sont fixés sur une planche séparée du poteau par une plaque de faïence, comme on le voit (*fig.* 1365); un petit toit, formé de deux plaques d'ardoise, préserve ces tubes de la pluie. En Suisse et en Allemagne, le fil fait un ou deux tours sur une espèce de champignon en verre de bouteille, surmontant le poteau, *c* (*fig.* 1366), ou un bras coudé fixé au poteau, *c'*. A des distances de 500 à 1000 mètres, se trouvent des mâts plus forts que les autres, dits *poteaux de traction* ou *tendeurs*, auxquels est adapté un systéme de deux petits treuils en fer galvanisé *t* (*fig.* 1367) soutenus par un chapeau en porcelaine, et autour desquels s'enroulent les extrémités des fils, de manière qu'on peut les tendre plus ou moins. Un rochet à cliquet les empêche de se dérouler. Le long des édifices, les fils sont soutenus sur des barres de bois verticales portées par des consoles en fer fixées au mur. Sous les tunnels, le fil passe dans des anneaux en porcelaine, et, à cause de l'humidité qui y règne habituellement, il est recouvert de gutta-percha. Quand on a plusieurs fils à soutenir, on les suspend aux mêmes poteaux. Cependant, dans certains pays, comme en Allemagne et en Suisse, on dirige les différents circuits qui joignent deux stations principales, par des lignes de poteaux différentes, ou en polygone, ce qui présente l'avantage de pouvoir servir un plus grand nombre de stations secondaires; de plus, si un accident arrive à un des circuits, la communication entre les deux stations principales n'est pas interrompue.

Par les temps de pluie ou de brouillard, une partie de l'électricité passe dans le sol par les poteaux, ce qui se reconnaît au moyen d'une petite boussole de sinus qui sert à éprouver le courant dans chaque station, et alors on ajoute quelques couples. En même temps, on détend le ressort de rappel des récepteurs qui en possèdent un, pour mettre sa force en rapport avec celle de l'électro-aimant. La pile est ordinairement composée de 28 couples, dont la moitié environ ne sert pas habituellement.

1842. Introduction de la terre dans le circuit. — Nous avons vu (1600), que Watson a déchargé des bouteilles de Leyde, au moyen d'un circuit dont le sol faisait partie sur une longueur de 2 milles. Après la découverte de Volta, plusieurs physiciens purent produire des commotions avec une pile isolée, dont les pôles étaient réunis de la même manière. Dès lors, M. Feschner pensa qu'on pourrait utiliser la conductibilité du sol, dans la télégraphie électrique, dont les premiers essais venaient d'être faits. Plus tard, en 1838, M. Stenheil remplaça par la terre, le fil de retour de son télégraphe écrivant. M. Jacobi, M. Bain et MM. Wheatstone et Cooke reconnurent ensuite que, non seulement la terre peut être substituée au fil de retour, mais encore que la résistance du circuit total est alors considérablement diminuée. Il résulte enfin des expériences faites par M. Matteucci en 1844, et de celles de M. Breguet sur la ligne de Paris à Rennes, que la terre n'oppose pas de

résistance sensible au courant; car l'intensité de ce dernier devient double, quand on remplace le fil de retour par le sol. M. Smaasen, dans un travail mathématique sur la propagation de l'électricité dans un corps solide à trois dimensions, a appliqué ses formules à la terre considérée comme conducteur réunissant deux pôles de la pile, et il est arrivé à cette conclusion, que la résistance est indépendante de la distance des électrodes [1].

Du rôle que remplit la terre dans la transmission. — Un fait important, c'est que, si plusieurs fils réunissent plusieurs appareils fonctionnant simultanément dans les mêmes stations ou dans des stations différentes, de manière que tous les circuits soient fermés par la terre, c'est-à-dire par un même conducteur, on trouve que chaque appareil fonctionne régulièrement. Les expériences de M. Marianini sur les courants qui traversent simultanément un liquide (1598), devaient faire prévoir ce résultat. Toutefois on n'est pas d'accord sur le rôle que joue le sol dans cette circonstance; on admet généralement que le courant parcourt la terre de la même manière qu'un conducteur métallique, et que, s'il n'y a pas de résistance, cela tient à ce qu'elle présente une section indéfinie. Cette manière de voir est confirmée par les expériences de M. Matteucci [2], qui a reconnu que la résistance de la terre est sensible et augmente avec la distance des électrodes, quand cette distance est moindre que de 50 mètres. De 60 à 100 mètres, l'intensité du courant cesse de diminuer, et au-delà elle commence à augmenter, et la résistance de la terre finit par devenir nulle; c'est que plus la distance est considérable, plus est grande l'étendue transversale dans laquelle se dissémine l'électricité. Cependant quelques physiciens, parmi lesquels nous citerons M. de La Rive, pensent que la terre joue un rôle tout différent. Ils admettent que les électricités, qui y arrivent sont absorbées par le réservoir commun et sont comme anéanties; ce qui expliquerait pourquoi la résistance est nulle dans le cas des grandes distances. A l'appui de cette explication, on fait remarquer qu'un courant peut avoir lieu avec une seule électricité, quand elle est absorbée, par une cause quelconque, à l'extrémité d'un fil conducteur; par exemple, quand elle est condensée dans une batterie à grande surface, quand on fait écouler dans le sol l'électricité empruntée à l'armature extérieure d'une batterie isolée dont l'armature intérieure se décharge dans l'air par des pointes. Dans les expériences de M. Faraday et de M. Wheatstone avec des fils télégraphiques enveloppés de gutta-percha (1604), des courants ont aussi été obtenus au moyen d'une seule électricité. L'explication dans laquelle on considère la terre comme un réservoir absorbant, est donc vraisemblable. En outre, les partisans de cette explication considèrent comme une objection à l'autre opinion, le fait de l'entrecroisement, sans se nuire, de plusieurs courants à travers le sol; il semble que l'électricité positive d'une pile va chercher et choisir pour la neu-

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XL, p. 246.
[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXI, p. 221.

traliser, la négative de la même pile, ce qui paraît bien difficile à concevoir. Mais, outre que les expériences de M. Marianini, que nous venons de rappeler, prouvent que plusieurs courants peuvent traverser dans différentes directions une même masse liquide, remarquons qu'il n'est pas nécessaire d'admettre que l'électricité positive d'une des piles va neutraliser précisément le fluide négatif de la même pile; il suffit que cette électricité rencontre du fluide négatif venant d'une pile quelconque, dont elle neutralisera une quantité égale à elle-même. L'électricité positive de la pile à laquelle cette électricité négative aura été empruntée, se combinera alors avec le fluide négatif non employé de la première pile. Il suffit, ce qui a toujours lieu, que la somme des électricités positives qui pénètrent dans le sol, soit égale à la somme des électricités négatives. On voit donc que les deux opinions peuvent être soutenues. Cependant, comme il résulte des expériences de M. Matteucci, que la terre oppose au passage des courants, une résistance qui augmente avec la distance, quand cette distance n'est pas trop grande, ce qui forcerait à admettre deux modes d'action si l'on voulait considérer la terre comme réservoir absorbant dans le cas de grandes distances, il semble préférable de considérer le sol comme faisant fonctions d'un conducteur à section indéfinie, dans lequel les courants se propagent à la manière ordinaire, sans éprouver de résistance sensible.

Quoi qu'il en soit, la découverte de la transmission par la terre a apporté une grande économie dans l'établissement des lignes, en permettant de supprimer un des fils. La communication avec le sol s'établit, soit au moyen de puits, dans l'eau desquels on fait plonger l'extrémité du fil terminée par une large lame métallique; soit, quand le sol est humide, au moyen d'un vieux rail que l'on enfonce profondément, et auquel on soude l'extrémité du fil. Quand le sol n'est pas très bon conducteur, on entoure la barre de fer, de coke en petits fragments, sur lequel on dirige les eaux pluviales.

1813. Effets de l'électricité atmosphérique. — Les fils aériens sont exposés de plusieurs manières aux actions de l'électricité de l'atmosphère. Par les temps sereins, et quand le vent déplace des masses d'air électrisées, il se développe par induction, dans les fils, des courants qui font jouer les appareils, et viennent brouiller les signes que l'on veut produire. Ces effets se manifestent encore sous l'influence des nuages orageux. Les *aurores boréales* peuvent aussi agir sur les appareils télégraphiques. Par exemple, le 29 août 1859, pendant un de ces phénomènes, les sonneries des stations, en France et en Belgique, furent plusieurs fois et longtemps en mouvement, et les dépêches interrompues par des courants intermittents. Ces courants changèrent plusieurs fois de sens; ils se manifestèrent surtout dans les lignes dirigées du nord au sud, et plus la ligne était longue, et plus les signaux étaient troublés. Des employés reçurent des commotions, et l'on aperçut de vives étincelles s'échapper des fils. — Enfin, il peut arriver que la foudre frappe les poteaux, les brise, les renverse, ou qu'en parcourant la ligne, le fluide vienne fondre les fils des électro-

aimants et produire dans les stations, des décharges dangereuses. Dans certains pays, en Angleterre, on arme chaque poteau d'un petit paratonnerre, et quand le temps est orageux, on fait communiquer le fil de ligne avec le sol dans toutes les stations. Mais alors le télégraphe ne peut fonctionner. On évite cet inconvénient au moyen d'appareils appelés *parafoudres*, dont les premiers ont été imaginés par M. Stenheil.

Parafoudres. — La *fig.* 1368 représente le parafoudre adopté en France ; c'est une combinaison de deux systèmes dûs à M. Walker et à M. Stenheil. Sur une table verticale en bois est fixé un conjoncteur *bp*, à l'axe duquel aboutit le fil de ligne *f*. Ce conjoncteur porte trois branches à ressort, qui peuvent être portées sur des boutons en cuivre ou *gouttes de suif* *a*, *b*, *t*, *r*. Le ressort moyen communique seul par l'axe avec le fil de ligne; les deux autres sont séparés de l'axe par une virole en ivoire, mais communiquent entre eux par un anneau métallique qui enveloppe cette virole. Les deux plaques de laiton D, D' garnies de pointes opposées deux à deux, constituent le *déchargeur*. Deux boutons à vis A et B sont réunis par un fil de fer très fin protégé par un tube ou par deux lames de verre. Les gouttes de suif *a*, *b*, *t*, *r* communiquent avec D, D', ou avec les bornes T et R, par des bandes de cuivre appliquées derrière la table, et dirigées comme l'indiquent les lignes ponctuées. La borne T communique avec la terre; et la borne R, avec le récepteur de la station. Cela posé, si le conjoncteur est placé comme dans la figure, son manche au-dessus de la plaque *p* sur laquelle est écrit le mot *parafoudre*, le courant de la ligne passe en *b* par le ressort moyen, vient en B après avoir traversé la plaque D, parcourt le fil de fer BA, remonte en *a*, franchit l'arc *ar*, et va dans le récepteur par la borne R. Si la foudre frappe le fil de ligne *f*, le fil fin AB est brûlé, ce qui sépare le récepteur, de la ligne, et l'électricité passant de D en D' par les pointes opposées, va se perdre dans le sol en passant en D'T. Le déchargeur DD' sert aussi, pendant que l'appareil fonctionne, à enlever l'excédant d'électricité que le fil de ligne peut recevoir de l'atmosphère, et à atténuer ainsi les perturbations qu'elle produit dans les signaux. Si l'on tourne le conjoncteur de manière que le ressort du milieu vienne en *r*, la ligne communique directement avec le récepteur; c'est ce que l'on fait quand il n'y a pas à craindre les effets de l'électricité atmosphérique, ou quand le fil AB a été brisé. Un anneau passé dans ce fil et attaché à la chaînette *c*, permet de reconnaître si ce fil est intact. Quand l'appareil est au repos, on a toujours soin de placer le conjoncteur verticalement, le manche sur la plaque *t'* qui porte le mot *terre*, et alors le fil de ligne est en communication directe avec le sol, par la borne T.

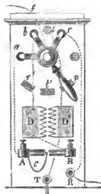


Fig. 1368.

La *fig.* 1369 représente un parafoudre imaginé par M. Bianchi. Le courant

de la ligne ff' traverse une boule de métal fixée au centre d'un globe de verre composé de deux parties mastiquées avec un anneau en métal. Cet anneau porte en dedans, de longues pointes qui s'approchent très près de la boule, et il communique avec le sol par la tige t. Un robinet r permet d'y faire le vide. Le courant de la pile ne possédant qu'une faible tension, ne se porte pas sur les pointes ; tandis que l'électricité de tension venant de l'atmosphère traverse le vide et passe dans le sol à travers les pointes.

Au lieu de faire le vide dans un appareil à pointes opposées, Masson avait pensé à entourer ces pointes d'alcool à 40°, qui isole les courants des piles, et conduit l'électricité de tension. Cette idée a été appliquée avec succès par M. Pouget-Maisonneuve.

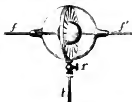


Fig. 1369.

1844. Fils souterrains. — Les effets de l'atmosphère sur les fils aériens, et, de plus, la facilité avec laquelle ils peuvent être brisés par accident ou par malveillance, avait fait adopter dans certains pays, notamment en Prusse, des fils enveloppés d'une matière isolante, et enfouis à une profondeur de 0m,50 à 0m,60. Ce système de conducteurs a été expérimenté d'abord, à St-Pétersbourg, par M. Jacobi, qui renfermait les fils dans des tubes de verre ; plus tard, il les recouvrit de caoutchouc. En Angleterre, en Amérique, on les enveloppa de coton imbibé d'un vernis isolant, et on les recouvrit d'un tube de plomb. Ces divers moyens étaient très imparfaits ou très dispendieux. L'importation de la gutta-percha par le Dr Montgomery qui faisait partie de la mission envoyée en Chine par le gouvernement français, vint simplifier la question. M. Siemens employa alors des fils recouverts de gutta-percha. Mais à la longue, la gutta-percha s'altère dans le sol, et il s'y fait des solutions de continuité par lesquelles l'humidité pénètre, oxyde le fil métallique et le rompt. M. Siemens, en s'appuyant sur les lois de Ohm, a trouvé moyen de reconnaître, en faisant quelques coupures, en quel point se trouve la rupture ; des regards ménagés de distance en distance facilitent l'opération. Mais malgré ces perfectionnements, la fréquence des ruptures et la difficulté d'y remédier, ont fait renoncer généralement à l'emploi des fils souterrains, dont l'établissement est, du reste, bien plus coûteux que celui des fils aériens. Cependant les premiers sont employés dans les villes, notamment à Paris ; seulement on les dispose d'une autre manière : tous les fils sont couchés dans une auge en bois, sur un lit de bitume, et recouverts d'une couche épaisse de la même substance. L'établissement de ces fils est coûteux, mais ils durent indéfiniment, et sont protégés contre la malveillance.

1845. Télégraphe sous-marin. — L'idée de communiquer à travers les mers, au moyen de l'électricité, a été conçue par M. Wheatstone, dès l'année 1840. La plus grande difficulté consistait à isoler le fil, dans un milieu aussi

bon conducteur que l'eau de mer. L'importation de la gutta-percha vint encore là à point, et M. Walker, en janvier 1849, fit avec succès une première expérience. Il submergea entre un point de la côte et un navire amarré dans le port de Folkstone, un fil de cuivre de 2 milles de long, recouvert de gutta-percha, et put établir une correspondance, d'une extrémité de ce fil à l'autre. Une compagnie se forma alors pour réunir la France et l'Angleterre, par un fil sous-marin jeté entre Calais et Douvres. L'opération, conduite par M. de Brett, réussit parfaitement, et pendant plusieurs jours on put échanger des signaux. Mais le frottement du câble sur les rochers du cap Ginès, où il aboutissait du côté de la France, déchira l'enveloppe de plomb qui formait sa seule défense, et les communications furent interrompues. Une nouvelle compagnie se forma ; elle eut soin de faire arriver le fil près d'une côte sablonneuse, et de lui donner une enveloppe très résistante, et réussit ainsi, sous la direction de MM. Wheatstone et Stephenson, à établir, par dessous les flots, une communication télégraphique définitive. Le câble avait été enroulé sur un treuil, et formait un cylindre de 10 mètres de diamètre installé sur le pont d'un navire à vapeur, le *Glazer*, qui le déroulait et le déposait au fond de la mer, à mesure qu'il s'avançait lui-même sur les flots. Des freins puissants empêchaient le poids du câble de faire tourner trop rapidement l'immense bobine. Des appareils télégraphiques, l'un sur la côte, l'autre à bord du navire, étaient en communication permanente avec les extrémités du câble, et servaient à vérifier à chaque moment le bon état des fils. L'inauguration de la ligne eut lieu le 13 novembre 1850, et le canon de Douvres tonna, allumé par l'électricité lancée des côtes de France.

Depuis, on a établi un grand nombre de communications sous-marines; nous citerons le câble de 217 kilomètres qui joint l'Angleterre à l'Irlande; le câble de Douvres à Ostende (112^{km}), de New-Brunswick à l'île du prince Edouard dans le golfe du Saint-Laurent (240^{km}), de la Spezzia au cap Corse (145^{km}), de la Corse à la Sardaigne et de la Sardaigne aux côtes d'Algérie (200^{km}); le câble de la Mer-Noire entre Varna et Balaklava (640^{km}), qui a rendu tant de services aux armées alliées, pendant le siége de Sébastopol.

Mais tous ces résultats ont été bien dépassés par le câble transatlantique destiné à faire communiquer l'Europe avec l'Amérique du Nord. Après de longues études et des sondages multipliés, exécutés principalement par M. Maury, on a choisi pour points de départ Valentia, sur la côte d'Irlande, et Saint-Jean-de-Terre-Neuve, sur la côte américaine. La distance est de 2640^{km}, et la profondeur croît, de 2740 mètres, en partant de Terre-Neuve, jusqu'à 3660 mètres, dans le voisinage de la côte d'Irlande. Le fond forme une surface assez unie, couverte de coquilles fossiles très délicates et bien conservées, ce qui indique qu'il y règne le calme le plus complet. Le câble, à cause des courbures du fond, a une longueur de 4105^{km}. L'opération difficile de la pose a parfaitement réussi, et l'on a pu faire la conversation par dessous les flots, d'une côte à l'autre, malgré les orages et les tempêtes, qui ne pouvaient plus opposer que

d'impuissantes barrières aux communications entre les deux continents. — Malheureusement après un succès aussi brillant, les communications ont tout-à-coup cessé, par quelque accident arrivé au câble; mais il reste toujours, de cette gigantesque expérience, la preuve acquise de la possibilité de la réussite, quand des ingénieurs hardis voudront un jour renouveler l'entreprise.

Structure des câbles sous-marins. — La *fig.* 1370 représente un tronçon *aa'* et une coupe transversale A du câble qui réunit la France à l'Angleterre. Ce câble contient 4 fils de cuivre, recouverts de gutta-percha en deux couches superposées ; le tout est enveloppé d'étoupes goudronnées, et recouvert en dernier lieu d'une armure formée de 10 gros fils de fer galvanisés tordus ensemble. Ce câble pèse 180,000 kil., sur une longueur de 30 kilomètres. Depuis, on a donné un moindre poids aux câbles; on ne les préserve par une enveloppe de fils de fer, que dans le voisinage des côtes, et sur les hauts fonds quand il y a des rochers. On voit en B la coupe du câble d'Irlande; il ne contient qu'un seul fil de cuivre, et ne pèse que 610 kilos par kilomètre. Le câble transatlantique était construit un peu différemment : le fil conducteur était formé d'un faisceau de 7 fils de cuivre soudés à leurs extrémités, recouvert de gutta-percha, puis enveloppé de fil de coton imbibé d'un mélange de poix, goudron, huile et suif. Enfin, l'armature était formée de 18 faisceaux de fil de fer, composés chacun de 16 brins tordus ensemble. Les 5 premiers milles, à partir de la côte, étaient préservés par des fils d'acier au lieu de fer. Le tout était recouvert d'une couche épaisse de goudron. On a calculé que tous les brins de fil de fer réunis bout à bout formeraient une longueur de 496,000 kilomètres, c'est-à-dire environ 1 fois et $\frac{1}{4}$ la distance de la lune à la terre. Cet immense câble a été immergé par parties, que l'on a soudées les unes aux autres, en ayant soin de recouvrir la soudure d'une couche de gutta-percha, préservée elle-même par une enveloppe métallique.



Fig. 1370.

1846. Ralentissement de la propagation électrique dans les fils sous-marins. — Les fils souterrains et les fils sous-marins présentent un grave inconvénient, qui consiste dans le ralentissement de la propagation électrique, provenant de ce qu'ils forment avec le milieu ambiant, de véritables condensateurs, dans lesquels l'électricité est dissimulée en grande proportion avant de parvenir à l'extrémité opposée (1605). Il en résulte qu'il faut mettre un intervalle de temps assez long entre les différents signes; autrement, le fil n'ayant pas le temps de revenir à l'état neutre, les électros des récepteurs restent en activité, et, dans le cas des appareils écrivants, les marques se confondent. M. Varley a reconnu, en répétant les expériences de M. Faraday, qu'il faut 7 secondes pour qu'un courant arrive à son maximum d'intensité, à l'extrémité d'un fil sous-marin de 24000 kilomètres de longueur, et que ce fil n'est déchargé que 7 secondes après qu'on a ouvert le circuit; il faudrait, dans

ce cas, 7 minutes en moyenne pour un mot. M. Varley a montré, à l'Exposition universelle de Paris, un appareil au moyen duquel il peut transmettre 25 mots par minute à travers le fil de Londres à Amsterdam, qui est enfoui sur une longueur de 40 kilomètres, et plongé dans la mer pendant 200^{km}. La méthode de M. Varley consiste principalement à déverser dans le sol, à la fin de chaque courant partiel, l'électricité accumulée dans le fil, et à faire passer le courant alternativement dans un sens et en sens inverse.

1847. APPLICATION DE LA TÉLÉGRAPHIE ÉLECTRIQUE. — Indépendamment des services que le télégraphe électrique rend aux gouvernements, aux diverses administrations et aux relations commerciales, il est d'une grande utilité pour la science dans une foule de circonstances. La météorologie en a déjà tiré plus d'un parti utile ; on peut, avec son secours, connaître au même moment l'état du temps dans les contrées les plus éloignées, annoncer à l'avance les tempêtes et les ouragans dans les pays vers lesquels ils se dirigent, afin qu'on puisse prendre des mesures pour en éviter ou en atténuer les effets, principalement sur les bords de la mer. On peut aussi transmettre dans les ports l'heure exacte de l'observatoire ou du méridien principal du pays, de manière que les capitaines de navire puissent régler leurs chronomètres, sans quitter le bord de la mer.

Les astronomes se sont servis du télégraphe électrique pour déterminer les longitudes. Cette importante application, d'abord faite en Amérique, a été répétée en Europe par M. Ayri, qui a d'abord déterminé, conjointement avec M. Quételet, la différence de longitude des observatoires de Greenwich et de Bruxelles. La méthode employée consiste, en principe, à lancer de l'un des observatoires, à une heure bien déterminée, un courant vers l'observatoire opposé, où il fait dévier une aiguille aimantée, et où l'on observe, au même instant, l'heure qu'il est au méridien de ce dernier observatoire ; ce qui se fait au moyen des pendules astronomiques contrôlées par l'observation du passage d'étoiles connues. Si l'électricité se transmettait instantanément, la différence des heures donnerait celle des longitudes ; mais comme il n'en est pas ainsi, on répète les expériences en sens inverse, c'est-à-dire en faisant partir le courant, de la station qui recevait d'abord le signal. De cette manière, l'erreur disparaît quand on prend la différence des heures, car elle porte alternativement sur l'heure la plus forte et sur la plus faible, heures qui sont l'une et l'autre augmentées par le temps que met l'électricité à se propager. La moyenne d'un grand nombre d'observations, dans lesquelles ils ont pris une multitude de précautions pour éviter toute espèce d'erreur, particulièrement celles qui peuvent affecter la mesure du temps, a donné aux deux éminents astronomes, pour différence de longitude des observatoires de Londres et de Bruxelles, 17′ 28″,9, nombre identique avec celui que l'on a conclu des observations de l'éclipse de soleil du 15 mai 1836. Des expériences nombreuses ont été faites, depuis, avec un appareil télégraphique spécial, pour déterminer la différence de longitude des observatoires de Greenwich et de Paris.

1848. Application à la sécurité des chemins de fer. — Les chemins de fer ont surtout tiré un immense parti de la télégraphie électrique. Il est facile de voir combien il est important, pour éviter les rencontres des trains, que l'on puisse annoncer longtemps à l'avance l'arrivée de ceux qui sont engagés sur la voie, particulièrement pour les trains spéciaux, qui circulent à des heures où la voie est ordinairement libre. L'exploitation des chemins de fer à une seule voie serait même presque impossible sans le télégraphe électrique. Cependant, il paraît que, sur la plupart des chemins américains à une seule voie on n'en fait pas usage habituellement : mais aussi il n'est pas de pays où l'on prenne aussi peu souci de la vie des hommes. Indépendamment de cet usage journalier, les chemins de fer empruntent aux télégraphes électriques divers systèmes de signaux destinés à en augmenter la sécurité ; nous allons en mentionner quelques-uns.

Télégraphes portatifs. — Une première invention à signaler est celle des télégraphes portatifs placés sur chaque train, et au moyen desquels le conducteur peut communiquer, quand il survient quelque accident, avec les deux stations entre lesquelles il se trouve. Pour cela, le train étant arrêté, il accroche l'un des bouts du fil de l'appareil, à un fil aérien destiné à cet usage, et il fait communiquer l'autre extrémité avec le sol, au moyen d'un coin en fer qu'il enfonce entre deux rails, ou par l'intermédiaire des roues en fer du wagon. Dans le circuit ainsi formé, se trouve une pile que porte le train. Le courant se bifurque et fait jouer les appareils des deux stations. M. Breguet a construit pour cet usage un télégraphe à cadran (1827) renfermé dans une boîte contenant aussi une pile de 18 couples de Daniell, n'ayant que 47^{cm} de longueur, 37 de hauteur, et 27 de largeur, et ne pesant que 23 kil. M. Hipp est allé encore plus loin ; il a construit un petit appareil de Morse qui, avec sa pile, est contenu dans une boîte de 25^{cm} de longueur sur 10 de hauteur et 15 de largeur.

Système de M. Tyer. — M. Tyer a imaginé, pour remplacer ces disques qui servent à indiquer à un train qui s'approche d'une station, si la voie est libre, un système de signaux électriques produits sur le train lui-même, et qui fonctionne avec succès depuis 1853, sur le chemin de fer de Londres à Douvres. A une distance de 500 à 1000 mètres de la station, sont établies entre les rails, deux bandes de fer isolées, qui forment les extrémités d'un circuit passant par la station. Deux ressorts suspendus sous la locomotive, et réunis par le fil du récepteur qu'elle porte, viennent s'appuyer, en passant, sur ces bandes, et ferment le circuit. Alors le récepteur de la locomotive marque si la voie est libre ou non. Ce récepteur contient un aimant, qui s'incline de manière à indiquer le signal de marche ou le signal d'arrêt, suivant le sens que l'on donne au courant au moyen d'un commutateur placé à la station, et tourné convenablement d'avance. Un cliquet à ressort fait persister le signal après que la locomotive a dépassé les bandes. En même temps, un récepteur placé à la station, fonctionne au moment de la fermeture

du circuit, et indique l'arrivée du train. Ce récepteur porte aussi un encliquetage qui fait que le signal persiste quand le circuit est ouvert. Cet ingénieux système a reçu de plusieurs inventeurs divers perfectionnements.

L'idée de fermer des circuits au moyen de bandes de fer placées de distance en distance, et sur lesquelles viennent frotter des appendices portés par le train, a été appliquée par M. du Moncel dans l'établissement d'un système automatique, c'est-à-dire fonctionnant sans l'intervention des employés. Dans ce système, le train correspond avec la station la plus rapprochée; à chaque station, les espaces parcourus par deux trains qui se suivent, sont indiqués sur un cadran à aiguille; deux trains allant à la rencontre l'un de l'autre, ou se suivant de trop près, sont avertis par des signaux qui se font sous les yeux du conducteur de la locomotive[1].

Citons encore les appareils de M. Marqfoy, qui ont été expérimentés avec succès sur les chemins de fer du Midi. Au lieu de faire jouer les disques à signaux qui précèdent les stations, au moyen de ces longs fils de fer qui présentent tant d'inconvénients, M. Marqfoy fait usage d'un courant électrique, qui, lancé de la station, dégage, au moyen d'un électro-aimant, un mouvement d'horlogerie qui fait tourner le disque, de 180°. En même temps, un excentrique adapté à l'arbre du disque, ferme un circuit, et une aiguille placée à la station, s'incline, de manière à prouver que le signal a été fait. Ces disques, plus ou moins modifiés dans leur mécanisme, ont reçu de M. Marqfoy diverses autres applications : il les emploie à signaler la présence d'un train entre deux points déterminés, soit pour empêcher d'en lancer un autre en sens contraire dans le cas de voie unique, soit pour empêcher un train de suivre de trop près, dans le cas de voie double. Il s'en sert aussi pour indiquer la position des aiguilles servant à diriger les trains sur différentes voies, aux points où il y a bifurcation. Si une erreur a été commise par l'aiguilleur, la position du disque avertit le conducteur de la locomotive, et le disque est assez éloigné des aiguilles pour qu'il ait le temps d'arrêter le train. Enfin, les appareils sont tellement disposés, que l'électricité atmosphérique ou un dérangement quelconque, ne peuvent jamais donner au disque la position qui indique la voie libre.

III. Horlogerie électrique.

1849. Dans les applications de l'électro-magnétisme à la mesure du temps, on peut proposer trois objets différents : 1° construire une horloge à pendule dont le mouvement soit perpétué au moyen de l'électricité; 2° communiquer le mouvement d'un *régulateur* ou horloge type, aux aiguilles de divers cadrans éloignés les uns des autres; 3° rendre solidaires plusieurs horloges ayant chacune leur moteur, de manière qu'elles restent toujours exactement d'accord.

[1] *Exposé des applications de l'électricité*, par M. Du Moncel, 2e édit., t. II, p. 185.

de l'Europe, les Etats-Unis d'Amérique se couvraient rapidement d'un réseau de fils électriques. Des lignes furent établies dans le nord de l'Afrique, dans les colonies anglaises ; et bientôt les mers ne furent plus un obstacle à ce genre de communications.

Nous allons passer à la description des systèmes les plus importants, principalement de ceux qui ont été adoptés dans différents pays et qui ont reçu la sanction de la pratique. Nous les classerons sous trois chefs principaux : *télégraphes à aiguilles*, *télégraphes à cadran*, et *télégraphes écrivants* ou *enregistreurs*. Dans tous, il faut distinguer quatre parties principales : 1° la communication entre les stations, formée en partie par des fils métalliques isolés, en partie par la terre ; 2° le ***manipulateur*** ou ***transmetteur***, au moyen duquel on lance l'électricité dans les fils de communication, pour produire les signaux à la station opposée ; 3° le *récepteur* placé à cette station, sur lequel les signes se manifestent ; 4° l'appareil qui fournit l'électricité. Cet appareil est ordinairement une pile de Daniell à longue durée (1464). En Angleterre, on se sert surtout d'auges divisées par des plaques d'ardoise, en compartiments remplis de sable mouillé avec de l'eau faiblement acidulée. Dans les compartiments, plongent des lames de cuivre et de zinc disposées comme cellos des piles à couronne (1434). On remplace aussi la pile, par un appareil d'induction. Nous allons d'abord nous occuper des différents systèmes de *récepteurs* et de *manipulateurs* ; nous parlerons ensuite des systèmes de communication entre les stations.

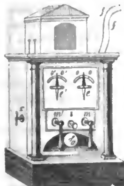


Fig. 1347.

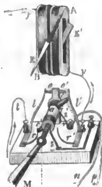


Fig. 1348.

1823. I. Télégraphes à deux aiguilles. — Nous allons d'abord décrire le télégraphe à deux aiguilles de MM. Wheatstone et Cooke, appareil généralement connu sous le nom de *télégraphe anglais*.

Récepteur. — Le *récepteur* est composé de deux multiplicateurs agissant chacun sur une aiguille indicatrice. AB (*fig.* 1348) représente un de ces multiplicateurs ; il est placé verticalement, et son système d'aiguilles compensées E, E' est équilibré de manière à prendre de lui-même la position verticale. La *fig.* 1347 représente l'ensemble de l'appareil. *e*, *e'* sont les aiguilles extérieures ; des chevilles *o*,*o* ; *o'*,*o'* en limitent les excursions dans un arc de 5° à 6° à partir de la verticale. Les signaux se font en lançant le courant dans un sens ou dans l'autre pendant un temps très court, de manière

à faire battre les aiguilles à droite ou à gauche, sur les chevilles *o,o* ; *o',o'*. En faisant faire à chaque aiguille 1, 2 ou 3 mouvements, soit à gauche, soit à droite, on obtient d'abord une quinzaine de signes, parmi lesquels on en a adopté huit. En combinant ces signes deux à deux, on en formerait un grand nombre d'autres, mais on n'utilise, comme étant les plus faciles à saisir, que ceux dans lesquels les deux aiguilles se meuvent parallélement. Voici les signes représentatifs des lettres de l'alphabet adoptés en Belgique ; les plus simples ont été naturellement appliqués aux lettres qui reviennent le plus souvent dans les mots. La lettre *g* indique un mouvement *à gauche*, de l'extrémité inférieure de l'aiguille, et la lettre *d*, un mouvement *à droite*.

UNE SEULE AIGUILLE EN MOUVEMENT.				MOUVEMENTS DE CHACUNE DES DEUX AIGUILLES oscillant parallèlement.	
AIGUILLE DE GAUCHE.		AIGUILLE DE DROITE.			
+ = *g*	**d** = *gd*	**h** = *g*	**m** = *gd*	**r** = *g*	**v** = *gd*
a = *gg*	**e** = *d*	**i** = *gg*	**n** = *d*	**s**, **z** = *gg*	**w** = *d*
b = *ggg*	**f** = *dd*	**k**, **q** = *ggg*	**o** = *dd*	**t** = *ggg*	**x** = *dd*
c = *dg*	**g**, **j** = *ddd*	**l** = *dg*	**p** = *ddd*	**u** = *dg*	**y** = *ddd*

Le signe +, nommé ***final*** ou *signe de repos*, s'emploie pour marquer la fin des mots. Il y a des signes de ponctuation, d'autres pour représenter les chiffres, pour indiquer certaines phrases ou certains mots, destinés à simplifier la correspondance, etc.

Manipulateur. — Pour lancer à volonté le courant dans un sens ou dans l'autre, on emploie le *commutateur oo'* M (*fig.* 1348). Un cylindre en ivoire *a*, que l'on peut faire tourner au moyen du levier ou *manette* M, porte deux chevilles en cuivre *c,c'*, parallèles à la manette. Ces deux chevilles sont implantées dans des viroles de cuivre qui garnissent les extrémités du cylindre d'ivoire, et qui communiquent par des ressorts *s*, *s'* avec les réophores *p* et *n* de la pile ; de manière que les chevilles *c*, *c'* peuvent être considérées comme les pôles de cette dernière. Deux ressorts *r*, *r'*, peuvent être poussés par l'une de ces chevilles, et deux autres ressorts *l*, *l'*, auxquels aboutissent les extrémités du circuit de la ligne *t*, F, peuvent être poussés par l'autre, et sont mis en communication l'un avec l'autre par une pièce de cuivre *oo'*. Enfin, les ressorts *lr* et *l'r'*, sont réunis deux à deux par une lame métallique. Cela posé, si l'on incline la manette M vers la gauche, comme dans la figure, les chevilles *c*, *c'* pressent les ressorts *l'* et *r*, et le premier est écarté de la pièce *o'* ; alors, le courant de la pile passe, par le ressort *s'* et la cheville *c*, dans le ressort *l'*, puis dans le fil F, circule dans le multiplicateur AB de la station où l'on opère, parcourt le *fil de ligne f*, circule autour du récepteur de la station opposée, et passe dans

son manipulateur. Ce dernier est au repos avec la manette verticale, de manière que les ressorts semblables à *l*, *l'* s'appuyant en *o*, *o'*, le courant passe directement de l'un à l'autre. Ce courant va ensuite dans la terre, et revient à la pile qui est au point de départ, par le *fil de terre t*, le ressort *r*, la cheville *c'* et le ressort *s*. Si l'on incline la manette M vers la droite, il est facile de voir que le courant circule en sens contraire. On voit en *mm'* (*fig.* 1347) les deux manettes qui correspondent aux deux systèmes d'aiguilles. Remarquons que le courant passant par le récepteur de la station, celui qui opère voit, sur les aiguilles qu'il a sous les yeux, les effets qui se produisent à la station opposée, et peut reconnaître ainsi si le courant passe bien, et s'apercevoir des erreurs qu'il pourrait commettre. Quand on attend une réponse, on place la manette M verticalement, le circuit est fermé en *oo'* et les courants qui arrivent de la station opposée, passent par le récepteur AB.

L'index *a* (*fig.* 1347) appartient à un interrupteur qui permet de faire communiquer entre elles les deux stations de droite et de gauche, de manière que l'appareil se trouvant en dehors du circuit, ces deux stations puissent communiquer sans faire mouvoir les aiguilles de la station intermédiaire. Ce système ,imaginé par M. Walker, se nomme *appareil silencieux*.

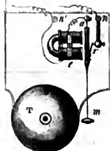


Fig. 1349.

Le télégraphe à deux aiguilles exige deux fils de communication; mais c'est un de ceux qui permettent la correspondance la plus rapide : on peut transmettre de 12 à 15 mots par minute, et même jusqu'à 20, dans les circonstances favorables. Cette célérité, la simplicité du mécanisme, la facilité de la manœuvre, forment les principaux mérites de ce système de télégraphe, qui n'exige aussi qu'un faible courant. On peut, du reste, simplifier encore, en se contentant d'une seule aiguille, et d'un seul fil de ligne ; mais alors les signes ne se font plus aussi rapidement, parce qu'il faut employer un plus grand nombre de battements. Cependant, on peut représenter toutes les lettres de l'alphabet en ne dépassant pas 5 battements pour un même signe.

1821. Avertisseur. — Dans la partie supérieure de l'appareil, est logée l'*alarme* ou *sonnerie d'appel*, nommée encore *avertisseur*. Cet appareil, qu'on peut séparer du circuit en tournant la clef *r*, consiste en un mouvement d'horlogerie faisant battre un marteau sur un timbre. Une des roues porte un arrêt qui vient butter contre un levier terminé par une pièce de fer doux. Un électro-aimant, dans lequel on lance le courant pendant un instant, attirant la pièce de fer doux, écarte le levier, et l'appareil se met à carillonner jusqu'à ce que la roue, ayant fait un tour entier, l'arrêt vienne de nouveau butter contre le levier revenu à sa première position par l'effet d'un ressort.

La figure 1349 représente le système de sonnerie de M. Mirand. Ce petit

appareil n'est autre chose qu'un *trembleur* de forme particulière : le courant de la ligne passe, par les boutons *n*, *n'*, dans l'électro *e*, en parcourant la partie *ar* du manche en fer du marteau *m*, qui est attiré. Le courant est alors interrompu en *r*, et le marteau revient sur ses pas sous l'action du ressort *a* par lequel il est fixé, et le circuit est ainsi fermé en *r*; le marteau est donc de nouveau attiré, et ainsi de suite. Dans ces mouvements, qui se succèdent rapidement, la tête du marteau frappe sur le timbre T, tant que le courant passe dans l'avertisseur.

1825. Télégraphe électro-magnétique à aiguilles. — Au lieu de produire avec une pile, les courants destinés à faire osciller les aiguilles, on se sert aussi d'une machine d'induction magnéto-électrique, qui sert alors de *manipulateur*. Tantôt un électro-aimant tourne d'un quart de révolution devant les pôles d'un aimant, soit pour s'en approcher et produire un courant induit inverse, soit pour s'en éloigner et produire un courant direct; tantôt on éloigne ou on approche directement cet électro-aimant, au moyen d'un levier, dans le sens du prolongement des branches de l'aimant La première disposition est réalisée dans le télégraphe de M. Henley ; l'aiguille du récepteur est mise en mouvement par un électro-aimant, dans lequel circulent les courants induits instantanés. Si l'on veut agir sur deux aiguilles, on emploie deux manipulateurs, et deux fils de ligne, la terre servant à fermer les circuits.

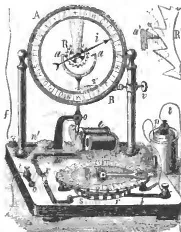


Fig 1350.

1826. II. TÉLÉGRAPHES A CADRAN. — Dès 1840, M. Wheatstone, en perfectionnant sans cesse ses appareils, a été conduit à la construction d'un télégraphe qui, au moyen d'un seul fil de communication, permet de désigner sur un cadran les signes qui s'y trouvent gravés. Cet appareil a reçu, depuis, un grand nombre de modifications. Nous allons d'abord décrire un des modèles que l'on emploie dans les cours, pour la démonstration.

Appareil de démonstration. — La partie supérieure ABe de la *fig.* 1350 représente le récepteur. Au centre d'un cercle AB se meut une roue R, garnie de dents obliques en nombre égal à la moitié du nombre des signes gravés en AB. Cette roue porte une aiguille *i* qui parcourt les signes; elle est mise en mouvement par les oscillations d'une *ancre aa*, dont les crochets, en pressant sur le milieu du côté oblique de chaque dent, la forcent à glisser et à s'avancer d'une quantité égale à la moitié de sa largeur; comme on le voit à part en R', où

la dent α, pressée par le crochet a', vient en α'. De cette façon, deux mouvements consécutifs et opposés de l'ancre font avancer la roue d'une dent, et font passer l'aiguille i sur deux signes consécutifs. Le mouvement oscillatoire est imprimé à l'ancre par un électro-aimant *e*, qui sollicite le contact en fer doux *c*, quand on lance de la station opposée, un courant dans le fil de l'électro. Lorsque ce courant est interrompu, le contact s'éloigne par l'action du *ressort de rappel* s', dont on règle la tension au moyen de la vis *v*. On peut donc, connaissant la position primitive de l'aiguille, faire passer le courant et l'interrompre un nombre de fois tel qu'elle vienne s'arrêter sur la lettre que l'on veut désigner.

Dans cet appareil, ainsi que dans ceux que nous allons décrire, on fait en sorte, par les moyens indiqués ci-dessus (1668), que le contact ne vienne pas toucher les surfaces polaires de l'électro-aimant, afin d'éviter le magnétisme *rémanent*.

Le *manipulateur*, qui se voit au bas de la figure, consiste en un plateau circulaire fixe P, autour duquel sont gravés, dans le même ordre, les signes du cercle AB. Une manivelle ou *manette m* peut tourner autour du centre de ce plateau, en entraînant avec elle un arbre vertical sur lequel est affermie une *roue à interruption r*. Un encliquetage ne permet la rotation que dans un seul sens. La roue *r* est en métal, et porte des échancrures remplies de bois, en nombre égal à la moitié des signes. L'arbre tournant est en communication constante, par une lame de cuivre *b*, avec l'un des pôles de la pile *p*. Un ressort *s*, qui s'appuie sur le contour de la roue *r*, laisse passer le courant quand il porte sur du métal, et l'interrompt quand il s'appuie sur du bois. Ce ressort communique, par la bande de cuivre *xn*, avec l'hélice de l'électro-aimant *e* (de manière que le récepteur AB fonctionne en même temps que celui de la station opposée), et se joint en n' avec le fil de ligne *f*. Le courant parcourt ce fil, circule dans l'électro d'un récepteur semblable à AB placé à la station qui reçoit les signaux, et passe dans le sol, avec lequel communique aussi le fil *t* de la pile. L'aiguille i étant supposée placée, ainsi que la manivelle *m*, sur le signe +, si l'on transporte cette dernière sur la lettre D, par exemple, on fera passer le courant deux fois, et on l'interrompra deux fois ; l'électro *e* fera donc faire à l'ancre *oaa* quatre oscillations, pendant lesquelles la roue R marchera de deux dents, et l'aiguille *i* franchira quatre signes et s'arrêtera sur la lettre D du cercle AB.

L'accord entre les indications du récepteur et du manipulateur peut être détruit ; par exemple, quand on tourne trop vite, et que le contact n'a pas le temps de revenir sur ses pas pendant l'interruption du courant. Celui qui reçoit la dépêche s'aperçoit bientôt de l'accident, parce que les lettres désignées ne forment plus de mots connus ; il en avertit son correspondant, et pendant que ce dernier porte la manivelle sur le signe +, il en fait autant de l'aiguille de son récepteur, en faisant mouvoir l'ancre avec le doigt.

Pour qu'il soit facile de transporter rapidement la manette *m*, d'une lettre à une autre, et l'y arrêter sans hésitation, cette manette est articulée avec

l'arbre tournant, de manière à pouvoir s'écarter du plateau, et elle porte en dessous une cheville ou *talon* qui s'enfonce dans un des crans pratiqués sur le pourtour du plateau, en face de chaque lettre. De plus, la manette porte une large ouverture à travers laquelle on peut voir la lettre sur laquelle on l'arrête. Il suffit donc, pour passer d'une lettre à une autre, de relever la manette, de la porter sur la seconde lettre, et d'enfoncer le talon dans le cran correspondant, où on le laisse pendant un instant, pour qu'à la station opposée on ait le temps de remarquer la lettre sur laquelle s'est arrêtée l'aiguille. Quand on attend la réponse, on sépare le manipulateur, du circuit; pour cela, on tourne la clavette x, et on la porte en o, ce qui fait communiquer le fil de l'électro-aimant avec un fil de terre t', de manière que le courant venant de la station opposée suive la route *fn'ent'*.

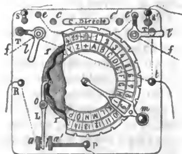


Fig. 1351.

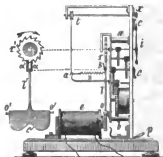


Fig. 1352. — 1/6.

L'appareil que nous venons de décrire, bon pour la démonstration, ne peut être employé pour les grandes distances, parce qu'il faut que le courant conserve assez d'intensité pour déplacer le contact *oc* avec assez de force pour faire mouvoir la roue R. M. Wheatstone a fait disparaître cet inconvénient en renonçant à faire jouer à l'ancre le rôle de *moteur*, et en faisant mouvoir l'aiguille par un mécanisme d'horlogerie; l'électro-aimant ne fait plus alors que déplacer un arrêt qui s'oppose au mouvement de l'aiguille, pour lui permettre de se transporter sur le signe que l'on veut désigner. M. Breguet a appliqué cette idée, en en perfectionnant singulièrement l'exécution, dans le télégraphe que nous allons décrire.

1827. Télégraphe à cadran de M. Breguet. — La *fig.* 1352 représente, vu de profil, le récepteur de cet appareil, très employé par les administrations des chemins de fer. *ab* est le mouvement d'horlogerie, *i* l'aiguille adaptée à l'arbre de la dernière roue *r*, et pouvant indiquer successivement 28 lettres ou signes tracés sur nn cadran vertical *cc*. Un levier *l* peut osciller autour de l'axe *o*, sous l'influence de l'électro *e* et du ressort de rappel *s*, qui peut être plus ou moins tendu au moyen d'un cordon, qui passe dans un anneau *a*

et s'enroule sur une poulie *t*. Une petite aiguille *x*, tournant sur un cadran divisé, permet de régler facilement la tension du ressort, que l'on modifie suivant la force de l'électro-aimant, force qui varie avec celle du courant, qui dépend elle-même de la longueur du circuit et des pertes qu'éprouve l'électricité par l'humidité de l'air. L'extrémité supérieure du levier *l* porte deux palettes formant fourchette, placées à une distance l'une de l'autre égale à la moitié de la distance de deux dents de la roue *r*, comme on le voit en *α α'*, où la roue *r* et le contact *o' c' o'* sont vus de face. De plus, les palettes ne sont pas dans un même plan parallèle à la roue, comme on le voit en *β*. L'une des palettes *α'* arrêtant la roue, si l'on fait passer un courant dans l'électro, le levier *l'* est déplacé, la palette *α'* abandonne la dent qu'elle retenait, et la roue tourne jusqu'au moment où la dent suivante vient butter contre la seconde palette *α*. Si l'électro-aimant laisse le contact s'éloigner par l'action du ressort *s*, la palette *α* abandonne la roue, qui marche de nouveau jusqu'à ce que la palette *α'* soit à son tour rencontrée par la dent qui suit. D'après la distance des palettes, on voit que la roue s'avance de la moitié de l'épaisseur d'une dent, quand le levier *l'* fait une demi-oscillation dans nn sens ou dans l'autre. — Pour que le jeu de cet appareil soit régulier, et que les mouvements puissent se succéder rapidement, il faut que la masse du contact, l'amplitude de ses oscillations, la tension du ressort de rappel, et la force du mouvement d'horlogerie, soient dans des rapports convenables, afin que les mouvements produits par les actions indépendantes de l'électro-aimant et de l'horloge, se fassent avec une rapidité égale. *p* est une pédale destinée à faire osciller le contact, pour placer l'aiguille, à l'avance, sur un signe voulu.

La figure 1351 représente le *manipulateur*. Un disque métallique, sur lequel sont gravés les mêmes signes que sur le cadran du récepteur, est fixé par trois colonnes sur une table horizontale en bois. La manette *m*, disposée comme celle de l'appareil précédent (1826), peut être soulevée et portée successivement sur les différentes lettres, et y être arrêtée au moyen d'un talon qui s'enfonce dans des crans ; elle entraîne dans son mouvement un arbre vertical auquel est fixée une roue métallique *rr*, dans l'épaisseur de laquelle est creusée une rainure présentant des sinuosités régulières, dont les parties convexes sont en nombre égal à la moitié du nombre des signes. Le disque est représenté déchiré pour laisser voir la roue. Dans la rainure, s'enfonce une cheville adaptée à l'extrémité d'un levier de métal L, qui prend un mouvement d'oscillation autour du point *o*, pendant que la roue *rr* tourne sur elle-même. En même temps, l'extrémité de ce levier vient toucher alternativement les arrêts garnis de ressorts *a*, *a'*. L'un de ces arrêts, *a'*, communique en P avec l'un des pôles de la pile ; l'autre, par la borne R, avec le fil du récepteur de la station, fil dont l'autre extrémité va dans le sol. Le fil de la ligne aboutit en *f*, *f* aux axes de deux leviers coudés *l*, *l'*, dits *conjoncteurs*, terminés en ressorts que l'on peut transporter successivement sur de petits disques de cuivre T, *s*, *e*, *c* ; T', *s'*, *e'*, *c'*, dits *gouttes de suif*. *s*, *s'* communiquent avec la sonnerie ; *e*, *e'* avec la roue à

interruption *rr* et le levier L, par le disque métallique et par une des colonnes qui le supportent; T, T′ et *t* communiquent avec le sol.

Les conjoncteurs étant tournés en *s* et *s′*, et la manette *m* placée sur le *final* +, le fil de ligne communique avec la sonnerie, et le levier L s'appuie sur l'arrêt *a*; l'appareil est alors au repos. Si on lance un courant de la station opposée, la sonnerie se fait entendre; le stationnaire averti, tourne les conjoncteurs sur *e*, *e′*, et répond qu'il est prêt. Alors les courants venant de la station de droite passent de *f*, en *e′*, de là dans la roue *rr*, le levier L, l'arrêt *a* et le récepteur qui communique avec R, et dont ils font marcher l'aiguille; de là, ils passent dans le sol, par lequel ils retournent à l'autre pôle de la pile. Pour répondre, il suffit de faire tourner convenablement la manette *m*. Le courant de la pile, qui arrive en P est établi quand le levier L s'appuie en *a′*, et il passe, par ce levier, le plateau *rr* et la goutte de suif *e′*, dans le fil de ligne qui aboutit en *f*, fait jouer l'aiguille du récepteur de la station opposée, dont la manette a dû être portée sur le final +, et revient à la pile, par la terre.

En temps d'orage, on porte les conjoncteurs en T, T′, et le fil de ligne communique avec le sol. Quand ils s'appuient en *c*, *c′*, le courant de la ligne ne passe pas par le récepteur de la station, mais il continue sa route et va faire jouer le récepteur d'une station plus éloignée, les gouttes *c*, *c′* communiquant avec la continuation du fil de la ligne.

On reproche au télégraphe à cadran la lenteur avec laquelle se succèdent les signes; la manette, devant parcourir une partie d'autant plus grande de la circonférence, que la lettre à signaler est plus éloignée de celle que l'on vient d'indiquer. On ne dépasse guère, en moyenne, une lettre par seconde. De plus, si le récepteur et le manipulateur cessent d'être d'accord, l'erreur se perpétue dans les signaux qui suivent. D'un autre côté, ce genre d'appareil présente cet avantage que les signes alphabétiques sont compris de tout le monde, et que l'appareil peut être manœuvré par le premier venu auquel on a une fois montré la manière d'opérer; ce qui est très important dans beaucoup de cas, par exemple dans l'exploitation des chemins de fer, où il est très utile que la plupart des employés puissent, à l'occasion, envoyer et recevoir une dépêche. Aussi s'est-on appliqué à simplifier la manipulation du télégraphe à cadran, à en rendre le jeu plus sûr et à augmenter la rapidité des signes. L'appareil suivant présente, à ces divers égards, de remarquables perfectionnements.

1828. Télégraphe à clavier et à cadran de M. Froment. — C'est principalement par le manipulateur que cet appareil diffère des autres télégraphes à cadran ; on y distingue un clavier de 28 touches portant les lettres de l'alphabet (*fig.* 1353), et il suffit d'abaisser une de ces touches pour que le signe qu'elle porte soit indiqué sur le récepteur de la station opposée. Pour obtenir ce résultat, il y a au-dessous du clavier un arbre d'acier, figuré à part en *ab*, à l'extrémité duquel est fixée la roue à interruptions, présentant 14 dents et 14 intervalles. Cet arbre porte des chevilles formant une spire

d'hélice, et en nombre égal à celui des touches. Un mouvement d'horlogerie fait tourner l'arbre et la roue à interruption, avec une vitesse de 2 à 3 tours par seconde, dès qu'en abaissant une des touches on déplace un cliquet engagé dans les dents d'une roue. Chaque touche porte en dessous un mentonnet qui arrête la cheville qui lui correspond, de manière que l'arbre et la roue d'interruption s'arrêtent après que le courant a passé un certain nombre de fois qui dépend de la touche abaissée, et que par conséquent l'aiguille du récepteur a franchi un nombre égal de signes. Dès que la touche est abandonnée à elle-même, elle se relève par l'action d'un ressort, et le cliquet, en retombant, arrête le mouvement d'horlogerie. Les deux touches extrêmes correspondent au *final* +. Il y a aussi une touche pour faire partir l'avertisseur. Le plus souvent, les touches sont disposées en deux rangées, comme dans la figure ; alors les chevilles de la première moitié de l'hélice sont arrêtées par la première rangée de touches, et celles de l'autre moitié, par la seconde rangée. — Malgré la rapidité du mouvement de l'arbre, cet appareil est construit avec tant de perfection, qu'on peut faire glisser le doigt au hasard sur le clavier, sans que le récepteur et le transmetteur cessent d'être d'accord.

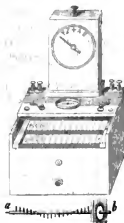


Fig. 1353.

1829. Télégraphe produisant les signaux de Chappe. — Dans ce système, d'abord adopté en France, on s'est proposé de reproduire les signaux des anciens télégraphes aériens. Les appareils, construits par M. Breguet, avec une rare perfection, sont disposés d'après les mêmes principes que le télégraphe à cadran du même artiste (1827) ; mais il y a deux systèmes semblables fonctionnant simultanément, afin de combiner les mouvements de deux ailes mobiles ; ce qui exige deux fils de ligne, tandis que les télégraphes à cadran, et le télégraphe de Morse, déjà adoptés dans d'autres pays et ayant reçu la sanction d'une pratique de plusieurs années, n'exigent qu'un seul fil. L'adoption des anciens signaux était donc un pas fait en arrière ; aussi, n'a-t-on pas tardé à les abandonner, et dès 1855 on a commencé à leur substituer le système de Morse.

La *fig.* 1354 représente l'ensemble de l'appareil à signaux de Chappe. Chacun des deux récepteurs se compose d'un mouvement d'horlogerie, disposé comme celui de la figure 1352 ; seulement, l'aiguille est remplacée par une aile *e* ou *e'*, formée d'une bande légère de mica, dont une moitié est noircie. Chaque aile peut prendre huit positions différentes en tournant avec la dernière roue du système d'horlogerie, qui n'a que quatre dents. La rainure sinueuse creusée dans la roue du manipulateur ne doit présenter aussi que quatre parties saillantes, ce qui lui donne la forme d'un carré à angles arrondis.

On voit *fig.* 1355, les roues d'échappement *r*, *r'* des deux récepteurs, avec les systèmes de palettes, *a*, *a'*, qui laissent échapper, en oscillant, les dents de ces roues. Les palettes *a* sont mises en mouvement par le levier *l*, agissant sur la fourchette *b*. Ce levier reçoit lui-même, de l'électro-aimant correspondant, et du ressort de rappel *s*, un mouvement oscillatoire limité par les vis fixes *v*, *v'*. A chaque mouvement du levier *l* en avant ou en arrière, il passe une dent de la roue *r*, et l'aile saute de $\frac{1}{8}$ de la circonférence. Les huit positions qu'elle prend, combinées avec les huit de l'autre aile *e'*, forment 64 signes différents. On voit en AB, au bas de la figure, les huit signes qui correspondent à une des positions verticales de l'aiguille de gauche.

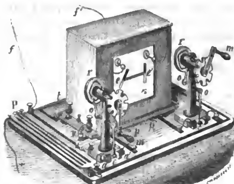


Fig. 1354. — 1/8.

Les deux manipulateurs correspondants aux deux récepteurs, se voient en *rm*, *rm* (*fig.* 1354). La manette articulée *m* porte un talon qui peut s'enfoncer dans un des huit crans d'un plateau vertical, contre lequel elle est pressée par un ressort. Elle entraîne dans son mouvement une roue *r*, dans laquelle est creusée la rainure quadrangulaire. Cette rainure reçoit une cheville fixée à l'extrémité supérieure du levier *ooc* tournant autour d'un axe *oo* qui traverse la colonne qui porte la roue *r*, et dont l'autre extrémité se termine par un ressort *c* qui s'appuie alternativement contre les deux arrêts métalliques isolés *a*, *a'*. L'un de ces arrêts, *a*, communique avec le conjoncteur *n*, qui est en relation avec l'un des pôles de la pile; l'autre arrêt, *a'*, est joint au bouton E, et au fil de l'électro-aimant, fil dont l'extrémité opposée communique avec le sol par la bande métallique *t*. Enfin, la colonne du manipulateur est en relation, par sa base, avec le fil de ligne *f*.

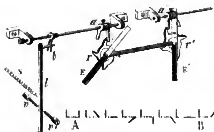


Fig. 1355. — 2/3.

Pour envoyer une dépêche, on porte la manette dans la position que l'on veut donner à l'aile du récepteur de la station opposée, ces deux pièces étant parallèles avant de commencer. Le courant est établi toutes les fois que le

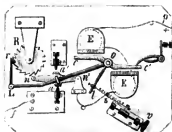
levier *oc* vient toucher l'arrêt *a* (*fig.* 1354); il passe de cet arrêt dans le levier *co*, par la colonne dans le fil de ligne *f*, qui le conduit au récepteur de la station opposée, d'où il revient à la pile par la terre. On fait de même avec l'autre manette, pour faire jouer l'aile qui lui correspond. Une même pile sert pour les deux parties de l'appareil. Ordinairement, on en a plusieurs de différentes forces, et l'on choisit celle qui convient pour la distance à laquelle on veut correspondre. L'un des fils de chaque pile aboutit à un des boutons P fixés à l'extrémité de bandes de cuivre ; on tourne le conjoncteur *n* sur la bande qui correspond à la pile que l'on veut employer. Quand on veut recevoir la réponse, on place les manettes horizontalement; alors le levier *oc* touche l'arrêt *a′* qui communique avec l'électro-aimant par le bouton E, et le courant venant du fil de ligne *f* passe, par la colonne, le levier *oc* et le conducteur *a′*E, dans l'électro-aimant, dont le fil communique avec le sol par la bande de cuivre *t*. — Quand le récepteur d'une station n'est plus d'accord avec le manipulateur de la station opposée, on ramène la manette et les ailes à la position horizontale, ce qui se fait, pour les ailes, en agissant sur les pédales *p*, *p*.

1830. Télégraphe automatique de M. Siemens. — Dans les télégraphes à cadran ordinaires, celui qui reçoit une dépêche doit attendre, avant de répondre ou de demander des explications sur un signe mal compris, que son correspondant cesse d'envoyer des signaux. Il en est de même quand il s'aperçoit qu'il n'y a plus accord entre son récepteur et le manipulateur qui fonctionne. Avec le système de M. Siemens, les deux stationnaires peuvent s'interrompre mutuellement, et converser, absolument comme ils le feraient de vive voix [1]. Dans ce système, le récepteur et le manipulateur de chaque station sont remplacés par un appareil unique à deux fins, qui fonctionne de la même manière pour recevoir, et pour envoyer une dépêche. Cet appareil n'est autre chose qu'un *trembleur* de forme particulière, dont l'armature mobile pousse à chaque oscillation, par le moyen d'un cliquet, une roue à dents qui porte l'aiguille indicatrice. Une même pile fournissant un courant continu au circuit, les armatures oscillent synchroniquement aux deux stations, et les aiguilles tournent par saccades, en passant aux mêmes instants par les mêmes lettres. Si maintenant on arrête une des aiguilles sur une lettre, ce qui interrompt les mouvements de l'armature, et si cela a lieu quand celle-ci est au milieu de son excursion, le courant est supprimé dans tout le circuit, et l'aiguille de la station opposée s'arrête sur la même lettre, avec son armature écartée de l'électro-aimant. Si l'aiguille de la première station est abandonnée à elle-même, les deux aiguilles se remettent à tourner jusqu'à ce que l'on arrête l'une d'elles sur une autre lettre. Pour arrêter commodément les aiguilles, il y a autour du cadran, des touches que l'on peut abaisser, et qui arrêtent un levier placé en dessous, parallèle à l'aiguille et tournant avec elle.

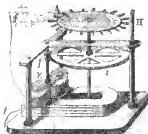
La *fig.* 1356 représente les principales pièces de l'appareil de M. Siemens.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXIX, p. 402.

EE sont les extrémités des branches de l'électro-aimant, munies de pièces polaires entre lesquelles oscille autour du point *o*, le contact *cc'*. Ce contact entraîne dans ses mouvements le levier *o*L, qui pousse le cliquet à ressort *r*, agissant sur la roue à rochet R. Le système est ramené en arrière par le levier *ol* et le ressort de rappel *s*, dont on règle la tension au moyen de la vis *v*. Le levier *o*L transmet ses oscillations à une pièce *nn'*, munie d'oreilles *a*, *a'*, qu'il pousse quand il s'approche des limites de ses excursions. La pièce *nn'* vient alors toucher alternativement des vis qui l'arrêtent. Le courant de la pile venant de *p* parcourt l'électro-aimant EE, passe en *n'*, de là dans l'arrêt *a*, quand le levier *o*L est abaissé, puis dans le fil de ligne *f*, arrive à l'autre station, traverse l'appareil qui s'y trouve, et pénètre dans le sol, par lequel il revient à la pile. Ce télégraphe, très bien exécuté par M. Halske, marche avec une grande régularité et une grande sûreté.


Fig. 1356.

M. Siemens y a annexé un appareil qui imprime les lettres de la dépêche, et dont voici le principe : une sorte d'étoile, à rayons élastiques, portant chacun à son extrémité une lettre en relief, tourne avec l'aiguille du cadran. Quand celle-ci s'arrête, le rayon qui porte la lettre qu'indique l'aiguille reçoit un coup de marteau qui imprime cette lettre au verso d'une bande de papier, appliquée sur un rouleau garni d'une encre assez épaisse pour ne pas tacher le papier. Aussitôt, celui-ci se déplace d'une quantité égale à l'espace qui doit séparer deux lettres consécutives. Le marteau est conduit par l'armature d'un électro-aimant puissant animé par une pile spéciale, et dont le circuit se ferme chaque fois que le courant est interrompu, c'est-à-dire à l'instant où s'arrête l'aiguille indicatrice, et par conséquent l'étoile tournante.


Fig. 1357.

1831. Télégraphe magnéto-électrique à cadran. — Nous aurons donné un exemple des principaux systèmes à cadran, quand nous aurons décrit un télégraphe dans lequel la pile est remplacée par une machine magnéto-électrique, servant en même temps de manipulateur. L'appareil de la *fig.* 1357 a été imaginé par M. Wheatstone ; c'est une espèce de machine de Clarke, dans laquelle l'électro-aimant E reçoit son mouvement de rotation d'une roue dentée *r* et d'un pignon *p*. Les lettres sont gravées sur un plateau A, et à chacune d'elles correspond un manche, que l'on amène et que

l'on arrête en face d'un repère H. La roue r' contient, dans l'espace angulaire qui sépare deux lettres du plateau A, un nombre de dents égal à la moitié de celui du pignon p ; de manière que l'électro aimant fait un demi-tour quand on remplace, devant le repère H, une lettre par la lettre suivante. Les pôles de l'électro-aimant étant d'abord en présence de ceux de l'aimant, il se forme deux courants consécutifs de même sens, qui se confondent en un seul. Si l'on fait faire un tour à l'électro-aimant, il se produit deux courants induits consécutifs de sens contraire (1727) ; de manière qu'il passe deux signes par tour, sur le récepteur à cadran, de même qu'il en passe deux du plateau A devant le repère H. Le récepteur est disposé comme celui des autres télégraphes à cadran ; seulement M. Wheatstone y apporte quelquefois une modification ingénieuse : il remplace l'aiguille par un disque de carton portant les lettres, et caché par un écran. Un guichet pratiqué vers le haut, permet de voir passer les lettres, et de distinguer celles qui s'arrêtent pendant un instant.

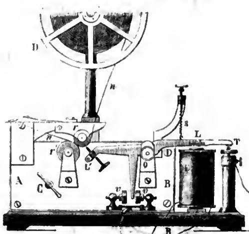


Fig. 1358. — 1/4.

1832. III. Télégraphes enregistreurs. — Nous avons vu que M. Stenheil a le premier imaginé d'écrire des signaux au moyen de l'électricité. Pendant qu'il se livrait à ses essais, M. Morse, professeur à New-York, imaginait le télégraphe enregistreur qui porte son nom ; il le fit connaître en 1837, mais il en avait conçu l'idée dès l'année 1832.

Télégraphe de Morse. — Cet appareil, désigné souvent sous le nom de *télégraphe américain*, est d'une simplicité admirable ; il a été adopté successivement en Amérique et dans presque tous les Etats de l'Europe. La *fig.* 1358 représente un modèle du *récepteur*. L' L est un levier pouvant osciller autour de l'axe o, sous l'influence de l'électro-aimant E et du ressort de rappel s, et dont les oscillations sont limitées par les têtes de vis v, v. Ce levier porte en L' une pointe émoussée en acier, ou *style*, qui s'appuie sur un ruban de papier nn, enroulé sur le dévidoir D, et constamment, entraîné par deux rouleaux tournants r, r', entre lesquels il est pressé comme entre les cylindres d'un laminoir. Un de ces rouleaux, r', est mu par un mouvement d'horlogerie AB, qui se monte au moyen de la clef C. M. Mouilleron a séparé les rou-

leaux *r*, *r'*, des rouages qui, dans les anciens appareils, se trouvaient au-dessous et en gênaient l'accès.

Quand le levier s'élève en L', la pointe fait, par pression, sur le papier, un trait plus ou moins long. Une rainure pratiquée circulairement sur le cylindre *r*, au-dessous du style, facilite le refoulement du papier ; et une rainure semblable du cylindre *r'* empêche l'empreinte d'être effacée quand le ruban passe entre les deux cylindres. Si le courant ne passe dans l'électro-aimant que pendant un instant, le style trace un point un peu allongé ; si le courant passe pendant un temps plus long, le style marque un trait. C'est par la combinaison des points et des traits que l'on forme les différents signaux. Voici le tableau des combinaisons adoptées en France :

·—	—···	—·—·	—··	·	··—··	··—·	——·	····	————
a	**b**	**c**	**d**	**e**	**é**	**f**	**g**	**h**	**ch**
··	·———	—·—	·—··	——	—·	———	·——·	——·—	·—·
i	**j**	**k**	**l**	**m**	**n**	**o**	**p**	**q**	**r**
···	—	··—	··——	···—	·——	—··—	—·——	——··	
s	**t**	**u**	**ü**	**v**	**w**	**x**	**y**	**z**	
·————	··———	···——	····—	·····	—····	——···	———··	————·	—————
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**0**

Le mouvement d'horlogerie ne doit être en marche que pendant la transmission des signaux ; dans certains appareils, la première oscillation du levier L'L déplace un arrêt qui fait partir l'horloge. On préfère, aujourd'hui, confier ce soin au stationnaire, qui met les rouages en mouvement, en poussant la tige *l* dès qu'il entend le bruit que fait le levier oscillant. Ce bruit est même assez fort pour dispenser d'avoir une sonnerie d'appel. Avec l'appareil de M. Morse, on peut écrire de 10 à 14 mots par minute, et en déchiffrer un nombre double, sur le ruban de papier. Dans certains cas, on a pu écrire jusqu'à 84 lettres par minute.

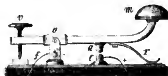


Fig. 1359. — 1/3.

Manipulateur. — Ce petit appareil, désigné sous le nom de *clef* ou *levier-clef*, consiste en un levier métallique *o m* (*fig.* 1359), mobile autour de l'axe *o* qui communique avec le fil de ligne *f*. La borne ou *enclume c* communique avec l'un des pôles de la pile. Si l'on abaisse le levier, en appuyant la main sur la tête *m*, le marteau *a* vient toucher l'enclume *c*, et le circuit est fermé. Quand on cesse d'appuyer en *m*, le levier se relève par l'action du ressort *r*, et le circuit est ouvert. Il suffit donc, pour produire à la station opposée, des points ou des traits, d'appuyer sur la tête *m* pendant un temps très court, ou pendant un temps double ou triple du premier. La vis *v* sert à régler l'amplitude des oscillations du levier.

M. Morse a aussi imaginé plusieurs dispositions, dont quelques-unes ont été de nouveau indiquées après lui, au moyen desquelles la dépêche est préparée à l'avance et est ensuite transmise par l'appareil lui-même. Par exemple, il découpe les extrémités de bandes de cuivre, de manière à y laisser des saillies rectangulaires plus ou moins larges représentant des traits et des points, et formant les divers signes; puis, il dispose ces bandes à côt édes autres dans le même plan, de manière à former les mots de la dépêche, comme dans une composition d'imprimerie. Il fait ensuite passer ce système sous un ressort, qui est soulevé par les parties saillantes de manière à fermer le circuit, et qui retombe en l'ouvrant, pendant le passage des parties basses. D'autres fois, ces bandes de cuivre sont arrangées en hélice autour d'un cylindre qui tourne au-dessous du ressort. Mais on préfère confier la manœuvre de l'interrupteur aux employés, qui ont bientôt acquis l'habitude d'opérer avec une rapidité et une sûreté merveilleuses, et même de connaître la dépêche, soit à l'inspection des mouvements du style, soit au son qu'il produit en formant les points et les traits; les premiers sont accompagnés d'un bruit semblable à celui que l'on produit en prononçant *di*, et les seconds, en prononçant *do-o*.

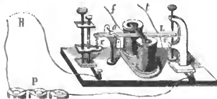


Fig. 1360. — 1/6.

1833. Relais. — Le jeu du télégraphe de Morse exige un courant assez intense; il faut donc, si la distance est considérable, disposer d'un grand nombre de couples. On évite cette nécessité par l'emploi d'un *relai*, appareil imaginé par M. Wheatstone, et qui lance dans le récepteur, le courant d'une pile voisine, de 3 ou 4 couples, dite *pile locale*, précisément à l'instant où le courant de la station opposée est lui-même lancé dans la ligne. Il existe plusieurs espèces de relais; la *fig.* 1360 représente un des systèmes les plus simples. Le courant de la ligne *ft* met en activité un électro-aimant; celui-ci abaisse le levier L mobile autour de l'axe *o*, et le met en contact avec une vis *v* qui communique avec l'un des pôles de la *pile locale* P, de manière à fermer le circuit de celle-ci, dont l'autre pôle communique, par le ressort de rappel *r*, avec le levier L. En R, est placé le *récepteur*, qui est mis ainsi en mouvement par la pile locale.

M. Siemens a imaginé un *relai* (*fig.* 1361) qui marche sous l'influence d'une très faible force. E, E′ sont les pôles opposés de deux électro-aimants simples parcourus par le courant de la ligne. Aux deux bases des cylindres de fer, sont fixées des pièces de fer doux, dont une se voit en *c* et *c*′. Le cylindre qui porte la pièce *c*′, peut tourner dans sa bobine autour de deux pointes s'enfonçant au centre de ses bases, tandis que la pièce *c* est fixe, ainsi que le cylindre qui la porte. Quand le courant de la ligne passe dans les électros E, E′,

On a donné un grand nombre de solutions de ces trois questions. Nous indiquerons quelques-unes de celles qui se recommandent par leur simplicité, ou qui ont reçu la sanction de la pratique.

1850. I. Horloges électriques. — La vitesse d'une horloge dépend de l'amplitude des oscillations de son pendule, et cette amplitude varie avec la manière dont se transmet la force motrice par l'intermédiaire des rouages, et, par conséquent, de l'état de ces derniers. On a cherché à obtenir une plus grande régularité en donnant les impulsions au pendule directement et sans rouages intermédiaires, et l'on s'est servi pour cela de l'électricité. La première horloge électrique a été imaginée par M. Bain; mais l'impulsion était donnée directement par un électro-aimant, dont la force dépendait de l'intensité, toujours variable, du courant. Cette impulsion n'était donc pas constante. aujourd'hui, dans toutes les horloges électriques, l'impulsion est donnée au pendule par une petite masse ou par un ressort, soulevés d'une quantité constante, par l'action d'un électro-aimant; tantôt elle est imprimée aux deux limites de l'amplitude, tantôt d'un côté seulement. Nous allons donner un exemple des deux cas.

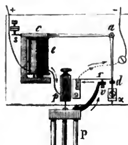


Fig. 1371.

Horloge de M. Froment. — Le pendule P (*fig.* 1371) est suspendu par une lame d'acier communiquant en *p* avec le fil d'un électro-aimant *e*. Une vis *v* placée latéralement vient toucher, à la fin de chaque excursion vers la droite, un léger ressort *r*, dont l'extrémité libre est soutenue par un petit disque *d* fixé à une tige verticale *da* guidée dans l'anneau *α*. Cette tige est articulée avec le prolongement *ac* du contact *c*, dont le point d'appui est sur le bord de l'électro-aimant *e*. Le ressort *r* communique avec l'un des pôles d'une pile, dont l'autre pôle communique avec le fil de l'électro. On voit que le circuit est fermé par *pvr*, toutes les fois que, le pendule se portant vers la droite, la vis *v* vient toucher le ressort *r*. Alors le contact *c* est attiré, la tige *ad* s'abaisse ainsi que le disque *d*, et le ressort *r*, devenu libre, presse par son élasticité la vis *v*, et donne une petite impulsion au pendule qui arrivait à sa limite d'amplitude, pour le faire revenir sur ses pas. Dés que la vis *v* se sépare du ressort *r*, le courant est interrompu, et le contact *c* se relevant par l'action du ressort de rappel *s*, le disque *d* soulève le ressort *r*, qui, par son élasticité de flexion, donnera une nouvelle impulsion au pendule, quand la vis *v* viendra de nouveau toucher le ressort. L'appareil a été représenté tel qu'il a été modifié par M. Hardy.

Compteur. — Il s'agit maintenant de transmettre le mouvement oscillatoire du pendule à un *compteur* ou *minuterie*, c'est-à-dire à un systéme de deux aiguilles indiquant sur un cadran les heures et les minutes. La *fig.* 1372 représente un compteur dû à M. Froment. Le courant, interrompu et rétabli successive-

les heures où ils ont lieu. L'appareil de M. Wheatstone donnant les mêmes indications, puisqu'il enregistre toutes les hauteurs, de 6 en 6 minutes, nous ne ferons que mentionner l'appareil de M. Liais, quoique très ingénieux et très exact.

1859. Applications aux observations du baromètre. — Masson s'est servi de l'électricité pour rendre plus précises les observations des baromètres à niveau variable : un fil rigide en platine, dont l'extrémité sert de repère, pénètre verticalement dans la chambre vide. Une vis micrométrique traverse le couvercle de la cuvette ; on connaît la distance entre l'extrémité du fil de platine et la pointe de cette vis, quand sa tête se trouve dans une position connue. Le fil et la vis communiquent avec les pôles d'une faible pile, et dans le circuit se trouve une sonnerie de Mirand (1824). La vis plongeant dans le mercure, on soulève le fond de la cuvette jusqu'à ce que le mercure, qui monte alors dans le tube, vienne effleurer le fil de platine, ce qui est indiqué aussitôt par la sonnerie. On retire alors la vis, jusqu'à ce qu'elle quitte la surface du mercure, ce qui a lieu au moment où la sonnerie s'arrête. La tête de la vis portant 100 divisions, et son pas étant de 1^{mm}, on évalue ainsi la longueur de la colonne barométrique, avec une approximation de 0,01 millimètre.

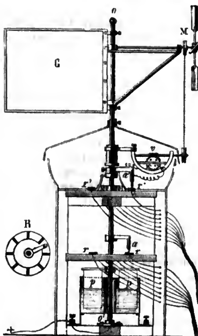


Fig. 1382.

1860. Anémomètres enregistreurs. — L'anémomètre est peut-être l'instrument dont il importait le plus d'enregistrer les indications, à cause des variations fréquentes du vent. L'anémomètre électro-magnétique de M. du Moncel note à chaque instant la direction et la force du vent, et indique en même temps l'heure de chaque observation [1].

La direction du vent est donnée par une girouette G (*fig.* 1382) fixée à sa tige *oo'* qui tourne avec elle. Des plaques *p*, *p*, plongées dans l'eau, empêchent les petites agitations irrégulières qui viendraient compliquer les indications. Un frottoir *a*, adapté à la tige tournante, glisse sur une roue *rr*, représentée de

[1] *Exposé des applications de l'électricité*, 2e édition, t. II, p. 373.

face en R, formée de 8 secteurs égaux isolés les uns des autres et correspondants aux 8 principales directions du vent. Les séparations entre les secteurs sont assez petites pour que le frottoir s'appuie toujours sur l'un d'eux. L'axe de la girouette communique en o' avec l'un des réophores d'une pile, et chaque secteur est muni d'un fil particulier passant par un électro E (*fig.* 1383), qui fait appuyer un crayon c sur un cylindre C tournant sur lui-même en 12 heures. Un pas de vis que porte l'axe, lui imprime en même temps un mouvement parallèle aux arêtes. Les 8 fils des 8 électros se réunissent au pôle négatif de la pile. Quand le frottoir touche un secteur de la roue rr (*fig.* 1382), l'électro correspondant abaisse contre le cylindre, le crayon qui dépend de son contact, et ce crayon trace une courbe qui indique, *par sa longueur*, le temps pendant lequel le vent est resté dans la direction correspondante, et, par sa position, les heures pendant lesquelles le vent a soufflé dans cette direction.

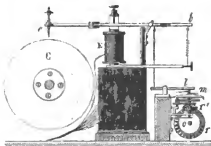


Fig 1383.

L'appareil donne aussi le temps total pendant lequel le vent a soufflé à différentes fois dans chaque direction. L'horloge qui fait tourner le cylindre C (*fig.* 1383) fait aussi tourner un arbre horizontal o qui porte 8 roues d'angle, r, commandant chacune une minuterie à deux aiguilles, m, placée derrière chaque électro-aimant. Le pivot de l'aiguille des minutes est habituellement soulevé par un ressort, de manière à rester indépendant du pignon r' qui doit lui communiquer le mouvement ; mais quand le contact de l'électro est attiré, son prolongement b agit sur un levier l, qui fait descendre le pivot de l'aiguille des minutes, et la minuterie se met en marche. Le nombre d'heures indiqué par le cadran, fait connaître le temps total pendant lequel le contact a été attiré, et par conséquent le temps pendant lequel le vent a soufflé dans la direction qui correspond à l'électro considéré.

Pour enregistrer la force du vent, M. du Moncel fixe derrière la girouette, un moulinet de Woltmann M (*fig.* 1382), qui se trouve ainsi toujours orienté. Ce moulinet transmet son mouvement, par l'intermédiaire d'une chaîne sans fin, à une vis sans fin v qui fait tourner une roue à 60 dents. La roue porte 4 chevilles servant à fermer 4 fois à chaque tour un circuit dont fait partie un électro, placé sur le prolongement de l'axe du cylindre enregistreur C (*fig.* 1383), et dont le contact mène un crayon dans le sens des arêtes. Ce crayon forme 4 traits pour chaque tour de la roue (*fig.* 1382), ou pour 15 tours du moulinet. Le nombre des traits marqués dans une portion donnée de la circonférence du cylindre, fera connaître le nombre de tours du moulinet pendant le temps correspondant, et, en même temps, les heures où le vent avait

on emploie une horloge électrique, il n'y a rien à ajouter à ce que nous avons dit plus haut ; seulement, le compteur (*fig.* 1272) est plus ou moins éloigné du pendule régulateur, et communique avec lui par de longs fils isolés. Mais quand il s'agit d'une horloge ordinaire, la moindre résistance pouvant modifier son mouvement, il a fallu imaginer des dispositions particulières. M. L. Foucault a eu l'heureuse idée de faire fermer le circuit par le pendule, au moment où il passe par la verticale, c'est-à-dire quand, ayant sa plus grande vitesse, il est moins sensible aux causes de perturbation. P (*fig.* 1376) est la tige du pendule, et *r*, *r'* sont deux ressorts qui ferment le courant, quand ils se touchent en *a*. La jonction est établie par le pendule, au moyen d'une tige *t* articulée en *o* avec une pointe qui s'enfonce dans une petite coupe en agate fixée à l'extrémité du ressort *r*. Le point *o* est relié au pendule par la tige *b*. Les longueurs de ces différentes pièces sont calculées de manière que la pression ait lieu en *a*, au moment où le pendule passe par la verticale.

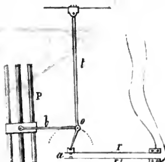


Fig. 1376.

Communications. — Les communications entre l'horloge-type et les divers compteurs, sont ordinairement établies par des fils aériens. On les fait passer successivement par les différents électros, qui fonctionnent ainsi tous en même temps. M. P. Garnier a imaginé un système de communications qui permet, en se servant de courants dérivés, d'augmenter le nombre des compteurs, sans déranger ceux qui existent déjà. Il établit d'abord deux fils principaux (dont un peut être remplacé par le sol), sur lesquels il soude les extrémités du fil de chaque électro-aimant, qui reçoit ainsi un courant dérivé. Ce courant peut lui-même fournir une dérivation pour un autre compteur. On fait ainsi des *prises* d'électricité, comme on fait des prises d'eau sur une conduite principale. L'électricité se partage entre les différents circuits dérivés, en raison inverse de leur résistance.

Sources des courants. — L'électricité employée dans l'horlogerie électrique est fournie par une pile. M. Bain avait essayé de la produire au moyen de la terre, en enfonçant simplement dans le sol humide une lame de cuivre et une lame de zinc, ce qui formait une espèce de pile de Bagration. M. Glæsner a employé des courants d'induction magnéto-électriques : un aimant vertical en fer à cheval est entouré par une hélice faisant partie du circuit ; le contact de cet aimant peut tourner autour d'une charnière fixée à l'une des branches, et il est muni d'un prolongement assez long sur lequel vient frapper un marteau soulevé à intervalles égaux par les chevilles d'une des roues d'une forte horloge. Le coup de marteau séparant le contact, de l'aimant, il se

produit un courant induit dans le fil qui entoure ce dernier, lequel courant est suivi d'un autre, au moment où le marteau en se relevant, permet au contact de se précipiter sur l'aimant.

1853. III. Régulateurs des horloges. — Au lieu de faire marcher des compteurs au moyen d'une horloge-type, M. Breguet s'est proposé de maintenir parfaitement d'accord plusieurs horloges ordinaires commandées par un même régulateur. Pour cela, il supprime le pendule de ces horloges, et fait marcher l'échappement au moyen des oscillations du contact d'un électro, dans lequel le régulateur lance le courant et l'intercepte à chaque oscillation de son pendule, comme dans le télégraphe à cadran (1827). L'électro-aimant n'agissant plus comme moteur, il suffit d'un très faible courant.

M. Bain a imaginé de régler les horloges, seulement toutes les 12 heures. Ces horloges marchent indépendamment les unes des autres, et à la fin de la période, quand l'aiguille des minutes du régulateur est verticale, ce dernier ferme un circuit passant par un électro placé derrière chaque cadran ; le contact est alors soulevé, et fait monter une fourchette qui vient attaquer une cheville fixée derrière l'aiguille des minutes, de manière que cette cheville venant dans l'angle de la fourchette, l'aiguille est ramenée sur la verticale, au même moment que celle du régulateur.

M. Faye a proposé de soustraire les horloges astronomiques aux variations de température, en les plaçant dans des caves à température invariable, et les faisant communiquer par des fils électriques, avec le compteur à secondes placé dans la salle d'observation. Les pendules électriques sont ici préférables, à cause de l'humidité des caves, qui ne leur est pas aussi nuisible qu'aux horloges à rouages.

IV. Applications aux observations scientifiques, etc.

1854. I. CHRONOSCOPES ET CHRONOGRAPHES. — L'électricité a été appliquée en 1840, par M. Wheatstone, à la mesure des intervalles de temps extrêmement courts. Les appareils destinés à cet usage ont reçu le nom de *chronoscopes*. On les a principalement employés pour évaluer la vitesse des projectiles. La *fig.* 1377 représente la disposition imaginée par M. Wheatstone. Une horloge *h*, dont le mouvement est arrêté par un cliquet retenu par le fer doux attiré d'un électro-aimant, marque les secondes et les fractions de secondes. Les fils de l'électro animé par la pile P, aboutissent à une cible composée de deux parties *a* et *b* qui ferment le circuit quand elles sont appuyées l'une sur l'autre. Ce circuit est d'abord fermé par un fil de dérivation *f* qui passe devant la bouche du canon qui doit lancer le projectile. Dès que ce dernier sort de la pièce, il brise le fil *c*, le circuit est interrompu, et l'horloge se met en marche. Mais quand le boulet frappe la cible, il ferme le circuit en *ab*, et le mouvement de l'horloge est arrêté. Le déplacement des aiguilles donne, en milliémes de

seconde, le temps employé par le boulet à parcourir l'espace *co*. Ce systéme comporte quelques causes d'erreur : par exemple, l'électro-aimant, n'abandonne pas son contact au moment précis où le courant est interrompu, et il faut un certain temps à l'arrêt, pour interrompre le mouvement ou le laisser partir. M. Wheatstone est parvenu à annuler à peu près ces causes d'erreur. — M. Hipp a apporté à l'appareil un perfectionnement important : l'horloge marche continuellement, mais les aiguilles n'en reçoivent leur mouvement qu'à l'instant où les dents d'une roue qui les commande s'engagent dans les dents d'une des roues de l'horloge ; à peu près comme cela a lieu dans le compteur de la syrène acoustique, et c'est l'électro-aimant qui est chargé de produire cette manœuvre.



Fig. 1377.

Chronographes. — En 1843, M. Constantinoff a mesuré la vitesse des projectiles au moyen d'un appareil enregistreur trés ingénieux, qui a été exécuté avec une grande perfection par M. Breguet. Voici quel en est le principe : un cylindre mu par une horloge tourne régulièrement, avec une vitesse de 2 tours par seconde. Deux crayons, retenus chacun par l'armature d'un électro, ont leur pointe très près d'une même arête du cylindre. L'un des électros fait partie d'un circuit dont le fil est replié un grand nombre de fois dans l'intérieur d'un cadre ou cible, et que doit briser le projectile. Le fil de l'autre électro-aimant passe par une seconde cible disposée comme la première. Quand le boulet traverse la première cible, il rompt le circuit du premier électro-aimant ; le crayon qu'il retenait vient alors s'appuyer contre le cylindre, sur lequel il trace une ligne perpendiculaire aux arêtes. Quand le projectile rompt le fil de la seconde cible, le second électro-aimant laisse de même son crayon tracer une ligne sur le cylindre. La distance entre les points de départ de ces lignes, donne le temps employé par le boulet pour aller d'une cible à l'autre. Par exemple, si cette distance est de 5 milliémes de la circonférence du cylindre faisant 2 tours par seconde, le temps cherché sera $\frac{5}{2000}$ de seconde. Le temps que met chaque crayon à tomber sur le cylindre, étant sensiblement le même pour tous les deux, ne produira pas d'erreur dans les résultats, si les deux électro-aimants sont identiques.

M. Siemens a évité la difficulté de remplir cette dernière condition, en employant au lieu de crayons, les étincelles de deux bouteilles de Leyde, qui

font une petite tache sur le cylindre en acier, et dont la décharge est déterminée par le passage du boulet à travers la cible.

M. Martin de Brettes a aussi beaucoup perfectionné les chronographes. D'autres inventeurs, MM. Beetz, Parisot..., ont imaginé d'autres dispositions. Nous allons encore citer le chronoscope de M. Pouillet, dans lequel il fait usage d'un principe nouveau, et l'appareil de M. le capitaine Navez, comme un des plus exacts, et celui avec lequel on a fait le plus d'expériences pour se procurer les données nécessaires au calcul des tables de tir.

1855. Chronoscope de M. Pouillet. — Dans la méthode de M. Pouillet, le temps très court pendant lequel passe un courant, est déduit de la déviation impulsive de l'aiguille d'un réomètre. On construit d'abord une table des déviations correspondantes à des durées connues du passage du courant : on colle sur un disque de verre une bande d'étain allant du contour au centre, qui communique avec l'un des pôles d'une pile. Un ressort, uni à l'autre pôle, s'appuie sur le contour, de manière que le circuit est fermé pendant le passage

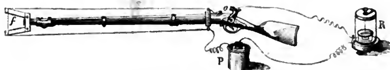


Fig. 1378.

de la bande d'étain sous le ressort. Faisant tourner le disque avec une vitesse uniforme, on observe quelle est la déviation impulsive que reçoit pendant un passage de la bande d'étain, l'aiguille d'un réomètre introduit dans le circuit, et l'on compare cette déviation à la durée du passage du courant, déduite de la vitesse du disque et du nombre de degrés qu'occupe la bande d'étain sur son contour. En répétant l'expérience avec différentes vitesses, on construit une table, qui ne convient qu'au courant dont on fait usage et au réomètre employé, car la déviation dépend de la masse, de la forme et de l'état magnétique de l'aiguille. M. Pouillet a trouvé cette déviation de 15°, avec un réomètre de Melloni et un couple de Daniell, quand le courant passait pendant $\frac{1}{5000}$ de seconde.

M. Pouillet a appliqué sa méthode à la mesure du temps que met la balle à parcourir la longueur du canon d'un fusil. Le fil du circuit passe en *f* (*fig.* 1378), et est interrompu en *o*, la batterie étant isolée. Dès que le chien s'abat, le circuit est fermé en *o*, et le courant passe jusqu'à ce que la balle, en sortant, coupe le fil *f*. De la déviation impulsive de l'aiguille du réomètre R, on déduit alors, au moyen de la table, le temps pendant lequel a circulé le courant, et par conséquent celui qu'a mis la balle à parcourir le canon. M. Pouillet a trouvé ainsi $\frac{1}{150}$ à $\frac{1}{130}$ de seconde, pour un fusil de munition chargé avec une cartouche réglementaire.

1856. Chronoscope de M. Navez. — Ce système, imaginé en 1848, nous offre une combinaison du chronoscope électrique et du pendule balistique. L'appareil se compose de trois parties principales : un chronoscope E*p* (*fig.* 1379), un *disjoncteur nn'*, et un *conjoncteur* E'*b*.

Le *chronoscope* est formé d'un pendule *p* pouvant osciller au centre d'un cercle divisé. La lentille de ce pendule est munie d'une petite masse de fer, au moyen de laquelle elle peut rester suspendue à un électro-aimant horizontal E fixé au cercle par une vis de pression, et dont le fil aboutit aux bornes *a* et *e*. L'axe autour duquel oscille le pendule, est enveloppé d'un manchon muni d'une rondelle en fer doux qui porte une aiguille *l* terminée par un vernier. Un léger ressort fait que l'aiguille et le manchon sont entraînés par le mouvement du pendule ; mais ce dernier continue à se mouvoir, quand l'aiguille est rendue fixe,

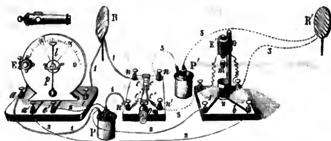


Fig. 1379.

par un électro-aimant qui attire la rondelle de fer doux, derrière laquelle il est placé, et dont le fil aboutit aux bornes *a'* et *e'*.

Le *conjoncteur* E'*b* consiste en un électro vertical E' soutenant une masse de fer *m* qui, en tombant sur le ressort *r*, fait enfoncer son extrémité recourbée, dans du mercure, et ferme un circuit dont fait partie ce ressort et la bande de cuivre *b*. Le *disjoncteur nn'* se compose de deux lames de cuivre fixes *c*, *c* isolées, communiquant avec les boutons *n*, *n*, et entre lesquelles s'engagent deux autres lames isolées *c'*, *c'*. Les lames *c'*, *c'* sont fixées à une tige qui traverse un cylindre dans lequel est un ressort à boudin, qui tend toujours à les éloigner des lames *c*, *c*. Si l'on pousse la tige, les lames se touchent, et les bornes *n*, *n*, *n'*, *n'* communiquent deux à deux. Un arrêt maintient ces lames en contact; mais si l'on presse le bouton *o*, on dégage l'arrêt, et le ressort fait subitement reculer les lames *c'*, *c'*.

L'appareil contient trois circuits ; les deux premiers, que nous désignerons par 1 et 2, reçoivent l'électricité de la pile P ; l'un, représenté par un trait double, passe par l'électro E, la cible R, dans laquelle il forme des sinuosités, et le *disjoncteur nn'* ; l'autre, 2, représenté par un trait simple, passe par l'électro placé derrière la rondelle de l'aiguille *l*, et par le *conjoncteur* E'*b* et le *disjonc-*

teur nn'. Le troisième circuit, représenté par une ligne ponctuée, et recevant le courant de la pile P', passe par une seconde cible R' et par le *conjoncteur* E'*b*.

Cela posé, on fait d'abord une expérience préliminaire. Les lames du disjoncteur *nn'* étant en contact, de manière que les circuits 1 et 3 soient fermés, on fait adhérer le pendule *p* à l'électro E, on place l'aiguille *l* sur le *zéro* de la division, et l'on suspend la masse *m* à l'électro E' du conjoncteur. On presse ensuite la détente *o*, les circuits 1 et 3 sont ouverts au même instant, et le pendule *p* se détache, ainsi que la masse *m*. Celle-ci vient fermer le circuit 2 entre *r* et *b*, l'électro placé derrière l'aiguille *l* attire la rondelle et arrête cette aiguille dans une position α, pendant que le pendule continue ses oscillations. On rétablit ensuite l'appareil dans son état primitif et l'on fait partir la pièce de canon. Le boulet coupant le fil de la cible R, le circuit 1 est interrompu et le pendule tombe. Un instant après, le boulet vient couper le circuit 3 en R', la masse *m* se détache et vient fermer le circuit 2, ce qui arrête l'aiguille *l*. Si les deux circuits 1 et 3 eussent été ouverts au même instant, c'est-à-dire si le boulet n'avait mis aucun temps à franchir l'espace RR', l'aiguille se serait arrêtée en α, puisque toutes les conditions de l'expérience sont restées les mêmes. Mais l'aiguille s'arrête un peu plus loin, en α, et la différence α α' correspond au temps employé par le boulet à parcourir la distance RR'. Ce temps se déduit par le calcul, de la valeur des arcs *o*α, *o*α'. La grandeur absolue de ces arcs dépend évidemment du temps que met la masse *m* à tomber sur le ressort *r*. On peut donc, en plaçant l'électro E' plus ou moins haut, donner à ces arcs la grandeur la plus favorable au calcul du temps employé par l'aiguille pour venir de α en α'.

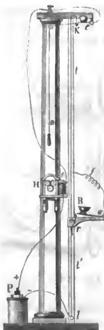


Fig. 1380.

1857. Chronoscope remplaçant la machine d'Atwood. — M. Wheatstone a appliqué sa méthode chronoscopique (1854) à l'étude de la chute des corps. La *fig.* 1380 représente un appareil construit sur les mêmes principes, par MM. Breton. H est le chronoscope, dont les rouages sont arrêtés par le *contact* de l'électro-aimant *e*, quand passe le courant de la pile P. Une lame de cuivre c, mobile à charnière et retenue par le crochet à ressort *k*, soutient une balle de métal. Quand on retire le crochet, en tirant le cordon *n*, la lame *c* s'abaisse brusquement, et la balle vient tomber librement dans une coupe R portée par un léger ressort R*a*. Ce ressort est fixé à un curseur que l'on peut arrêter à différentes hauteurs sur la règle *kl*. Le courant passe par l'électro *e*, la lame de cuivre c, le crochet *k* et la tige *tt'*, qui descend le long de la règle et

communique avec le pôle négatif de la pile. Un fil de dérivation *f* peut aussi faire passer le courant par la coupe R, le ressort *r*, quand la coupe le touche, et par la tige *t'*. Pour faire l'expérience, on tire le cordon *n*, la balle tombe, et en même temps la lame *c* se séparant du crochet *k*, le circuit est ouvert en *ck*; alors, le contact de l'électro *e* se déplaçant, le chronoscope H se met en marche. Quand la balle arrive en R, la coupe s'abaisse sous le choc, le circuit dérivé est fermé en R*r*, et le courant étant rétabli dans l'électro, le chronoscope est arrêté. Du chemin qu'ont parcouru les aiguilles, on déduit le temps qu'a mis le corps, à tomber de la hauteur *k*R.

1858. II. APPLICATIONS AUX OBSERVATIONS MÉTÉOROLOGIQUES. — C'est encore M. Wheatstone qui a le premier appliqué l'électricité à l'enregistrement des observations météorologiques. L'appareil qu'il a imaginé a été installé entr'autres à l'observatoire de Kiew. La *fig.* 1381 en donnera une idée. On y distingue deux parties principales, l'une destinée à recueillir les indications, l'autre à les enregistrer; chacune d'elles posséde un mouvement d'horlogerie particulier. Nous prendrons pour exemple les observations barométriques. Le baromètre *bb'* (*fig.* 1381) est à siphon; il est parcouru par un courant qui passe par un fil fixe plongeant en *b* dans la colonne de mercure, et par un autre fil rigide en acier, enfoncé dans la branche ouverte et pouvant sortir du mercure et y rentrer alternativement. Ce fil est suspendu à une fine chaîne *n* qui s'enroule sur une poulie *r* affermie sur un arbre *fr* qui fait partie du circuit, et que fait tourner par intermittences une horloge HH. Quand le mouvement a lieu, le fil d'acier est soulevé et finit par quitter le mercure, ce qui ouvre le circuit. Quand le fil est arrivé à une certaine hauteur, l'horloge abandonne la poulie à elle-même pendant 1 minute; et le fil redescend dans le mercure, par l'effet du contrepoids *n*. La course du fil est de $4^{cm},06$, il met 5^{m} à remonter, et à cause de la minute employée à descendre, il recommence à monter toutes les 6 minutes.

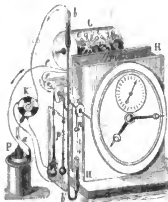


Fig. 1381.

On voit que le circuit reste fermé pendant une partie d'autant plus grande de la course du fil, que le mercure est plus élevé dans la branche ouverte du baromètre, c'est-à-dire que la pression atmosphérique est plus basse. Si donc on pouvait connaître la fraction des 5 minutes qu'emploie le fil à monter, pendant laquelle le courant reste fermé, on en pourrait déduire la position du niveau du mercure. C'est ici que l'enregistreur va jouer son rôle.

Le mouvement imprimé à l'arbre de la poulie est communiqué en même temps, à deux sortes d'étoiles *c*, *c*, à rayons élastiques portant à leur extrémité des

caractères en relief. Au moment où le fil quitte le mercure, le contact d'un électro-aimant par lequel passe le courant, et dont le fil apparaît en *e*, *f*, s'écarte, et laisse partir le second mouvement d'horlogerie, qui n'est pas représenté dans la figure, et qui fait frapper aussitôt un marteau *m*, sur les extrémités des deux rayons intérieurs horizontaux des étoiles, de manière à imprimer les caractères que portent ces deux rayons, sur un cylindre C garni de papier. Aussitôt, ce cylindre est attaqué par une came qui le fait un peu tourner sur lui-même, et en même temps il se déplace dans le sens de son axe, l'un de ses tourillons étant taillé en vis et engagé dans un écrou fixe.

L'une des étoiles porte 15 rayons garnis de lettres; l'autre, 12 rayons portant les 10 premiers chiffres et 2 repères. La première fait un tour en 30 secondes, et par conséquent 10 tours pendant les 5 minutes que le fil met à monter. L'autre avance d'un rayon en 30 secondes; l'empreinte qu'elle donne indique donc le nombre de tours accomplis par la première avant la rupture du circuit, et la lettre imprimée par celle-ci, le nombre de ses bras qui ont passé devant le cylindre en plus des tours entiers. Si l'on sait à quel déplacement de l'extrémité du fil d'acier correspond la substitution au précédent, d'un bras de l'étoile aux 15 rayons, on en conclura la distance du niveau du mercure au point le plus bas de la course du fil. Or, cette étoile faisant 10 tours, ou laissant passer 150 rayons pendant que le fil accomplit son ascension de $4^{cm},06$, on voit que l'on peut indiquer 150 positions du niveau du mercure, ou apprécier des variations $\frac{1}{150} \times 4^{cm},06 = 0^{cm},27$, ou $\frac{1}{4}$ de millimètre environ. L'observation n'étant enregistrée qu'au moment où le fil quitte le mercure, on voit qu'il n'y a pas à s'occuper des changements de niveau produits par l'immersion du fil.

Un même appareil peut servir à enregistrer les indications de plusieurs instruments. Celui de la figure enregistre aussi les indications d'un *psychromètre p*, dont les deux thermomètres sont ouverts par le haut, et reçoivent des fils d'acier qui montent et descendent au moyen de poulies fixées au même arbre que la poulie *r*. Un réotome *k*, commandé par l'horloge HH, fait passer le courant de la pile *p*, successivement par les trois instruments, de manière que les signes frappés sur le cylindre C leur correspondent alternativement. Ce réotome consiste en une roue en bois portant trois secteurs métalliques équidistants, auxquels sont attachés les fils fixes des trois instruments; un frottoir mené par l'horloge, et dont l'axe communique avec le fil *a* de la pile, tourne et vient s'appuyer successivement sur les secteurs. Une indication de chaque instrument est enregistrée toutes les 18 minutes, puisqu'il faut à chaque fil 6 minutes pour monter et descendre. Remarquons que le thermomètre et le psychromètre doivent être exposés à l'air libre; mais rien n'empêche de transmettre le mouvement de l'horloge HH aux poulies, par l'intermédiaire de fils, comme dans les compteurs électro-chronométriques (1852), pendant que les étoiles restent à côté de l'horloge et du cylindre enregistreur.

M. Liais a imaginé un appareil qu'il nomme *barométrographe*, qui enregistre le maximum et le minimum du baromètre en 24 heures, et de plus, fait connaître

tige t', et du levier coudé $l'r'$, le cliquet r' qui agit sur la roue des secondes. Pendant ce temps-là, l'électro E étant aimanté, son armature relève le ressort R par l'intermédiaire de la tige t qui porte une clavette au-dessous de l'armature, soulève la masse m, et engage le pied de biche c au-dessous de ce ressort, qu'il soutient. Quand ensuite le pendule, revenant vers la gauche, quitte le ressort R', le courant cesse de passer en E, et l'armature A retombe en abandonnant la masse m, et glissant le long de la tige t, qui la traverse sans frottement. Mais dès que la branche B vient soulever un peu le ressort R, le crochet c se dégage entraîné par le poids m, et le ressort R, rendu libre, donne l'impulsion à la branche B du pendule. En même temps, ce ressort agit, par l'intermédiaire de la tige t et du levier l, sur le cliquet r, qui pousse la roue à secondes. Pendant ce temps-là l'électro E' est aimanté, le contact A' est attiré, et soulève le ressort R' et la masse m', de manière que le pied de biche c' s'engage sous le ressort R'. s est un ressort de retient.

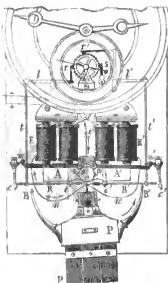


Fig. 1373.

1852. II. Compteurs électro-chronométriques. — On nomme ainsi des minuteries ou compteurs, qui mis en mouvement par l'électricité, indiquent les mêmes heures sur différents cadrans placés à de grandes distances les uns des autres. La télégraphie électrique donna naturellement l'idée de cette application, et dès l'année 1840, M. Wheatstone employait son télégraphe à cadran à indiquer l'heure en plusieurs endroits différents ; la roue d'interruption du manipulateur était mue par une horloge proprement dite. D'autres inventeurs, entr'autres M. Bain, arrivaient, de leur côté, au même résultat. Mais c'est à M. Froment, et surtout à M. P. Garnier, que l'on doit d'avoir rendu cette application pratique. Ce dernier a établi, dans la gare du chemin de fer, à Lille, puis sur les lignes de Lyon et de l'Ouest, des cadrans dont les aiguilles marchent d'accord avec celles d'un régulateur, ou horloge-type, qui règle les intermittences des courants. Plus tard, on a disposé dans certaines villes des *lanternes-horloges* donnant, par l'intermédiaire d'un courant, l'heure du régulateur qui les commande. M. Nollet a établi les premières, à Gand ; on en a installé, depuis, à Paris, Lyon, Marseille... La figure 1371 représente une de ces lanternes, avec une des dispositions imaginées par M. Detouche, pour faire fonctionner la minuterie. A est l'électro-aimant ; toutes les fois que

la vitesse enregistrée. Il est facile de connaître la direction qu'avait le vent correspondant à chaquo vitesse. L'appareil peut aussi faire connaître la vitesse pendant chaque direction, au moyen d'un frottoir *a* et d'une seconde roue à 8 secteurs *r'r'* (*fig.* 1382) munis de leur fil, et d'un enregistreur particulier, qui n'est pas représenté dans la *fig.* 1383. On voit que l'anémomètre et l'enregistreur peuvent être très éloignés l'un de l'autre ; le premier peut être installé sur un édifice élevé, au sommet d'uno montagne. Les 8 fils de communication sont alors réunis en un faisceau dans lequel ils sont isolés les uns des autres.

M. J. Salleron a construit un anémographe perfectionné, dans lequel il emploie, pour indiquer la direction du vent, le système de roues de M. Piazzi-Smith (II, 1138), et pour indiquer la vitesse, le moulinet à hémisphère de M. Robinson (II, 1140). Au lieu d'enregistrer les indications au moyen de crayons commandés par des électro-aimants, M. Salleron enveloppe le cylindre, d'une feuille de papier chimique sur lequel s'appuient 9 styles en acier. Le cylindre tournant est alors en métal, et communique avec le pôle négatif de la pile, et le style, par lequel arrive le courant, avec le pôle positif.

1861. Enregistreur du passage des étoiles. — Cet appareil, que M. Airy a établi à l'observatoire de Greenwich, consiste en un cylindre tournant régulièrement sur lui-même ; au-dessus d'une même arête, sont deux crayons relevés par les contacts de deux petits électros qui sont fixés à un chariot se déplaçant suivant une arête du cylindre, de manière que les marques des crayons forment une hélice. L'horloge qui fait tourner le cylindre, interrompt à chaque seconde le courant de l'un des électros, et le crayon qu'il soutient marque alors des points équidistants indiquant les secondes. L'autre électro est parcouru par un courant continu ; au moment où une étoile passe par le fil de la lunette méridienne, l'observateur presse un bouton, le circuit est ouvert, et le crayon retombe et marque un point, dont la position par rapport à ceux qui indiquent les secondes, fait connaître l'heure du passage de l'étoile au méridien. On évalue les fractions de seconde d'autant plus facilement, que les points équidistants sont plus espacés, c'est-à-dire que le cylindre tourne plus rapidement. — Pour obtenir une grande exactitude, il faut que le cylindre tourne bien réguliérement, et non par saccades comme cela a lieu quand il est condnit par une horloge à régulateur oscillant. M. Airy a rempli cette condition en faisant usage du *pendule conique*, c'est-à-dire d'un pendule qui décrit réguliérement un cône dont le sommet est à son point de suspension.

1862. III. APPLICATIONS DIVERSES. — Les applications de l'électro-magnétisme se multiplient de jour en jour. Nous pourrions en donner une longue liste. Citons comme exemple les métiers à tisser, dans lesquels M. Bonelli, M. Maumenée,..., ont remplacé les cartons de Jacquard par des systèmes d'électros et des cylindres réotomes disposés de manière à mettre en activité les électros qui correspondent aux fils de chaîne qui doivent être soulevés. Nous devons ajouter cependant qu'il est quelques-unes de ces applications qui ne

paraissent pas rationnelles. Toutes les fois, en effet, que l'électricité n'apporte pas plus d'économie ou plus d'exactitude que les moyens purement mécaniques, son emploi ne présente qu'un embarras de plus et doit être proscrit. C'est surtout quand on veut produire des effets à de grandes distances, que cet agent devient précieux, comme dans l'horlogerie électrique et la télégraphie.

Nous allons encore faire connaître deux appareils importants à divers points de vue : l'un, destiné à perpétuer le mouvement du pendule dans la belle expérience de M. L. Foucault destinée à prouver le mouvement de la terre (I,125) ; l'autre servant à régler la distance des charbons dans l'expérience de la lumière électrique.

1863. Conservation du mouvement du pendule de M. L. Foucault. — P (*fig.* 1384) est une sphère qui sert de lentille au pendule. Un électro de forme cylindrique E qui reçoit le courant de la pile *np* est placé verticalement au-dessous, de manière que les centres de ses bases soient exactement sur la verticale passant par le point de suspension. La sphère du pendule contient un cylindre vertical en fer doux, dont l'axe coïncide avec le prolongement du fil de suspension. Il faut que ce cylindre soit attiré par l'électro, pendant chaque demi-oscillation descendante. La difficulté consistait principalement à fermer et ouvrir, au moment convenable, le circuit de l'électro, et cela sans se servir du pendule pour faire jouer le réotome, car on aurait porté atteinte à la liberté de ses mouvements. Voici par quel moyen ingénieux M. L. Foucault, aidé de M. Froment, est parvenu à résoudre le problème, en se servant de la réaction exercée par le fer du pendule, sur l'électro-aimant qui l'attire. Cet électro-aimant, E, est appuyé sur un ressort R, et soutient un levier métallique *ol* équilibré par le contrepoids *q*. Ce levier, en s'abaissant, vient frapper la borne *a*, et ferme le circuit *peolan* d'un second électro *e*. Ce dernier agit alors sur le levier en fer *o'l'* et l'abaisse, de manière à fermer en *l'a'* le circuit *p*E*o'l'n* de l'électro E. Mais ce levier *o'l'* ne peut s'abaisser que peu à peu, car il porte un cliquet *r* qui pousse une roue à dents obliques et fait tourner un volant *v* par l'intermédiaire d'une seconde roue dentée. Ce n'est qu'après que ces rouages ont défilé, que le circuit se trouve fermé en *l'a'*, après un temps qui dépend du moment d'inertie du volant. Voici maintenant comment fonctionne l'appareil. Supposons que le pendule soit au commencement d'une demi-oscillation descendante; l'électro E comprimant par son poids le ressort R, abaisse le levier *ol* et ferme en *la* le circuit de l'électro *e*, le levier *o'l'* est alors attiré et ferme en *l'a'* le circuit de

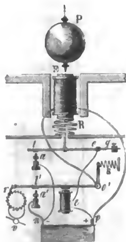


Fig. 1384.

l'électro E. Ce dernier attire donc le fer doux du pendule et en accélère le mouvement, sans rien changer à la direction du plan d'oscillation, l'action s'exerçant dans un plan vertical passant par le point de suspension. Quand le pendule arrive très près de l'électro E, le fer qu'il contient réagit pour soulever cet électro, le circuit est donc interrompu en *la*, et l'électro *e* rentrant à l'état neutre, le levier *o'l'* se relève sous l'action du ressort de rappel *s*, et l'électro E n'agit plus sur le pendule, qui peut accomplir sans obstacle sa demi-oscillation ascendante. Il est vrai que le pendule n'a pas plus tôt quitté la verticale, que l'électro E, revenu à l'état neutre, descend en comprimant le ressort R, et rétablit le courant dans l'électro *e*; mais comme le levier *o'l'* ne s'abaisse que peu à peu, à cause du système de rouages *rv*, le pendule a le temps d'arriver à la limite de son amplitude avant que le circuit ne soit fermé en *l'a'*, et que le courant ne soit rétabli en E.

1864. Régulateur de la lumière électrique. — Quand on emploie l'arc voltaïque pour l'éclairage, il est nécessaire de rapprocher les charbons, à mesure qu'ils s'usent. On a imaginé pour cela divers appareils qui fonctionnent sous l'influence même du courant qui fournit l'arc lumineux. MM. Staite et Petri en Angleterre, et M. L. Foucault en France, ont les premiers résolu le problème chacun de leur côté, en 1848. L'appareil de M. L. Foucault présente l'avantage de conserver à l'arc voltaïque une position fixe, en faisant mouvoir l'un et l'autre charbon; ce qui est souvent essentiel, par exemple, comme nous le verrons pour les applications aux expériences d'optique. L'appareil de M. Duboscq (*fig.* 1382) remplit aussi cette condition. Les deux charbons *c*, *c'* sont fixés à des tubes métalliques *t*, *t'* pouvant glisser verticalement dans les pièces qui les supportent. Le premier, *t*, est sollicité à monter par un ressort de montre renfermé dans un barillet *br*, par l'intermédiaire d'un cordon *e* qui s'enroule sur une poulie fixée au barillet, et passe sur une poulie de renvoi. L'autre tube, *t'*, tend à descendre par son poids; mais il est retenu par un cordon en soie enroulé autour d'une seconde poulie *r*, et descend quand cette poulie tourne avec le barillet. Le mouvement du barillet se transmet par l'intermédiaire de rouages et d'une vis sans fin, à une dernière roue dentée horizontale qui est arrêtée par un crochet que pousse le levier *i*. Ce n'est que lorsque ce crochet s'écarte des dents, en s'élevant, que les rouages peuvent se mettre en mouvement. Or, il faut que cela ait lieu quand la distance entre les charbons a augmenté, par la combustion, ou le transport des parcelles. Pour remplir cette condition, on fait passer le courant qui produit l'arc voltaïque,

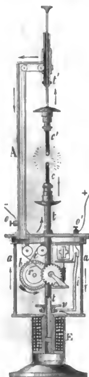


Fig. 1382.

dans le fil de l'électro E ; les flèches indiquent la marche de ce courant, qui entre en o' et sort en o. Le fer doux de l'électro est foré, de manière à laisser passer et à guider le tube *t*. Tant que le courant n'est pas trop affaibli par la distance qu'il a à franchir entre les charbons, l'électro retient son armature *v*, le levier *i* est abaissé, et les rouages sont arrêtés. Mais quand cette distance a sensiblement augmenté, l'armature s'écarte par l'effet d'un ressort placé au-dessous, les rouages deviennent libres, le barillet tourne, et les charbons se rapprochent. Mais alors le courant reprend son intensité première, l'armature est attirée, et les rouages sont arrêtés de nouveau par la tige *i*.

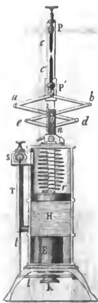


Fig. 1386.

Comme les cordons qui soutiennent les charbons sont sujets à se rompre, M. Duboscq a donné un nouveau modèle de son appareil dans lequel des roues dentées de diamètre convenable tournant en sens contraire, agissent sur des crémaillères adaptées aux porte-charbon. Le charbon supérieur est alors soutenu par une potence qui glisse dans un tube vertical, comme la potence P' P' de l'appareil de la figure 1387.

Régulateur à liquide. — On a reproché aux régulateurs que nous venons de décrire la complication de leur mécanisme. MM. Duboscq et Marçais ont alors imaginé le régulateur (*fig.* 1386) dans lequel il n'y a aucuns rouages. Le porte-charbon supérieur P est soutenu par un piston, qu'on peut remonter au moyen d'un pignon agissant sur une crémaillère, et qui est pressé sur de l'huile, H, par un ressort *r* disposé comme celui de la lampe dite *à modérateur*. Le porte-charbon inférieur positif est soutenu en P' par un système de losanges articulés *abde* dit *grenouillère*, fixé en *o*, et dont l'angle *n* est tiré vers le bas, quand le piston descend, par un talon fixé à la crémaillère. Alors P' monte d'une quantité qui est à celle dont descend le charbon *c* comme *ab* : *ed*. Le piston descend quand l'huile peut s'échapper par le haut du tube T, fermé par une soupape que commande la tige *t*. En E', est un électro-aimant parcouru par le courant qui fournit l'arc voltaïque. Quand ce courant s'affaiblit, le contact *k* descend, et le levier tirant la tige *t*, ouvre le passage à l'huile, qui tombe au-dessus du piston. Celui-ci descend, et les charbons se rapprochent. Alors le courant reprenant de la force, le contact remonte et le passage de l'huile est intercepté.

Des charbons. — Dans la plupart des régulateurs, le rapport entre les déplacements du charbon positif et du charbon négatif est toujours le même ; il faut donc que les charbons s'usent dans ce rapport, ce qui n'a pas lieu avec ceux qu'on emploie ordinairement. Nous avons parlé des tentatives que l'on a

faites pour obtenir des charbons purs, homogènes, et ne donnant pas de scintillations (1538). M. Jacquelain vient de réussir en composant de toutes pièces des charbons très durs en carbone pur, avec lesquels la lumière de l'arc est calme comme celle de la meilleure lampe. Alors, le charbon positif s'use deux fois plus que l'autre.

Il existe un grand nombre de régulateurs de la lumière électrique proposés par divers inventeurs. La plupart présentent cet inconvénient que, si l'arc est interrompu par une cause quelconque, il faut l'intervention d'un surveillant pour ramener les charbons au contact et rétablir le courant; ce qui est impossible dans les cas où les appareils ne sont pas accessibles; par exemple, quand on opère sous l'eau, dans les mines, dans le vide, auxquels cas l'appareil est renfermé en vase clos. M. V. Serrin a imaginé un régulateur avec lequel l'arc se rallume de lui-même.

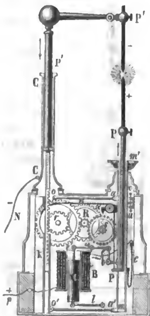


Fig. 1387.

Régulateur de M. V. Serrin. — Les charbons sont fixés par des vis de pression aux porte-charbon mobiles PP, P'P' (*fig.* 1387). Le premier PP est un tube qui glisse dans un manchon *m'm* articulé aux leviers *oa*, *o'a'* mobiles en *o* et *o'* et pouvant osciller dans des limites réglées par les vis *v* et *u* contre lesquelles vient butter un mentonnet fixé au manchon. Le second porte-charbon P'P' s'enfonce librement dans la colonne *isolée* CC, et agit par son poids sur un pignon *r*, par l'intermédiaire d'une crémaillère *k*. Le pignon *r* entraîne une roue, qui en fait tourner deux autres R et S; mais la dernière est arrêtée par un crochet α porté par le manchon *m'm*. Sur l'arbre du pignon *r*, est affermie une poulie autour de laquelle s'enroule une chaînette *n* qui passe sur une poulie de renvoi et soulève le porte-charbon PP, quand la crémaillère descend avec le porte-charbon P'P'. Le rayon de la poulie est double de celui du pignon *r*, de manière que le charbon inférieur, qui est positif, monte deux fois autant que le charbon supérieur ne descend. Enfin le manchon *m'm* est soutenu en *b* par un levier *e'ωe* équilibré par une masse de fer doux M engagée dans une bobine B. Cette masse est soulevée quand le courant passe, et d'autant plus qu'il est plus intense, et elle descend, en faisant monter le manchon *m'm*, quand le courant s'affaiblit (1674). Des poids placés dans la coupe *m'* qui surmonte le manchon servent à l'équilibrer avec la masse M. Le courant de la pile arrive en *p*, circule dans la bobine,

et communique par la chaîne *c* avec le porte-charbon inférieur, et revient à la pile par le charbon supérieur, la colonne C et le fil N.

Quand le courant est interrompu, les charbons sont en contact ; mais dès que le courant est établi, la masse M est soulevée, le manchon *m'm* s'abaisse jusqu'à ce que la vis *u* l'arrête, en entraînant par frottement, le porte-charbon PP et en même temps le charbon supérieur monte un peu sous l'action de la chaînette *n*, qui tire sur la poulie *r* de manière à faire monter la crémaillère. En même temps le crochet *α* s'engage dans les dents de la roue *s*, et l'arc voltaïque est formé. L'écart des charbons ayant un peu affaibli le courant, la masse M descend un peu, et le manchon remonte, de manière que son mentonnet se tient entre les deux vis *u* et *v*, et que le crochet ne touche une dent de la roue *s* qu'à l'extrémité. Si le courant s'affaiblit par le raccourcissement des charbons, la masse M descend encore, le manchon monte jusqu'à ce que la vis *v* l'arrête, et le crochet *α* abandonnant la roue *s*, la crémaillère descend avec le charbon négatif, pendant que le charbon positif est soulevé par la chaînette *n* qui s'enroule sur la poulie *r*. Dès que le courant a repris son intensité, la masse M remonte, le crochet *α* arrête la roue *s* et l'appareil est rétabli dans sa position normale.

Si le courant est interrompu, la masse M descend, le crochet *α* abandonne la roue *s*, et les charbons sont rapprochés jusqu'au contact ; le courant est alors rétabli et l'arc se reproduit comme nous l'avons expliqué en commençant. La chaîne *c* est assez grosse pour que le poids de la partie qui est attachée au porte-charbon compense la perte de poids du charbon inférieur, de manière que le levier *cωc'* reste toujours équilibré de la même manière.

Cas des appareils magnéto-électriques. — On peut former l'arc électrique au moyen de machines magnéto-électriques. On a cru d'abord qu'il était nécessaire de ramener, au moyen de commutateurs, les courants induits successifs à avoir toujours le même sens. Mais il résulte d'expériences faites à Chaillot sous la direction de M. Degrand, que la lumière reste calme quand on supprime le commutateur. Les courants changeant de sens à chaque instant, les charbons s'usent alors également, et le régulateur consiste dans un simple mouvement d'horlogerie qui les fait marcher avec une vitesse égale, réglée au moyen d'un volant à ailettes placées plus ou moins obliquement.

L'application des machines magnéto-électriques à l'éclairage des phares ou à celui des navires à vapeur, n'offre plus désormais de difficultés. L'appareil de M. Nollet, connu sous le nom de machine des invalides (1732), mu par un moteur à vapeur de deux chevaux, donne avec les charbons de M. Jacquelain une belle lumière, deux fois plus intense qu'avec des charbons ordinaires. En réunissant les six machines en deux groupes de trois, formant deux appareils mis en communication avec les charbons par leurs pôles opposés, on a pu augmenter encore la lumière de plus d'un tiers.

FIN DU TOME TROISIÈME.

TABLE DES MATIÈRES

DU TROISIÈME VOLUME.

LIVRE V.

ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME.

CHAP. III. — SOURCES D'ÉLECTRICITÉ. PILES.

CHAP. IV. — EFFETS DE L'ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE.

CHAP. V. — ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE. PROPAGATION.

CHAP. VI. ÉLECTRO-MAGNÉTISME ET ÉLECTRO-DYNAMIQUE.

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.





